

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

**Affidabilità e sicurezza degli UAS:
Applicazione di tecniche RAMS
sul sistema "Venture LE"**



**Politecnico
di Torino**



Relatore

Prof. Maggiore Paolo

Candidato

Motolese Alessio Gaetano
matricola: S269951

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

Indice

1	Uno sguardo generale sul mondo degli UAS	1
1.1	Storia e sviluppo di un'idea rivoluzionaria	1
1.1.1	Gli inizi	2
1.1.2	Le due Guerre Mondiali	2
1.1.3	La Guerra del Vietnam	4
1.1.4	Operazione Desert Storm	5
1.1.5	Guerra in Bosnia ed Erzegovina	5
1.1.6	Guerre in Afghanistan ed Iraq	6
1.1.7	Al giorno d'oggi	6
1.2	Nomenclatura e Classificazione	7
1.2.1	Acronimi e Nomenclature	7
1.2.2	Classificazione secondo il binomio accessibilità/tecnologia	8
1.2.3	Tassonomia NATO	13
1.2.4	Classificazione secondo peso/dimensione	14
1.3	Architettura dei moderni UAS	16
1.3.1	Telaio	18
1.3.2	Batterie	18
1.3.3	Motori	19
1.3.4	Eliche	19
1.3.5	Electronic Speed Controller	20
1.3.6	Autopilota	20
1.3.7	GPS	20
1.3.8	Power Management Unit	21
1.3.9	DataLink	21
1.3.10	Trasmittitrice e Ricevente	21
1.3.11	Cablaggi	21
1.4	Regolamentazione ed ambiti di utilizzo	22
1.4.1	Enti Aeronautici	22
1.4.2	ICAO	22
1.4.3	EASA	23
1.4.4	ENAC	24
1.4.5	ENAV	24
1.4.6	ANSV	24
1.4.7	Regolamentazione in vigore	25
1.4.8	Missioni ed ambiti di utilizzo	27

2	Analisi RAMS	31
2.1	Introduzione	31
2.2	Reliability	32
2.3	Availability	39
2.4	Maintainability	42
2.5	Safety	46
2.5.1	Fault Tree Analysis (FTA)	49
2.5.2	Hazard and Operability Study (HAZOP)	51
2.5.3	Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)	52
2.5.4	Failures Mode, Effects and Criticality Analysis	53
3	PRO S3, Eccellenza Italiana	55
3.1	L'azienda	55
3.2	Mission and Vision	56
3.3	Ambiti operativi	56
3.3.1	Settore Automotive	56
3.3.2	Impianti industriali	56
3.3.3	Settore Aerospaziale	56
3.4	Prodotti d'eccellenza	57
3.4.1	WAVESIGHT	57
3.4.2	VENTURE LE	58
3.4.3	ICON V2 MY2022	58
4	Analisi del Venture LE	59
4.1	Architettura di sistema	59
4.2	Metodologia	60
4.2.1	Risk Analysis	62
4.2.2	Risk Evaluation	63
4.2.3	Risk Reduction Measures	63
4.2.4	Safety Function Identification	64
4.2.5	Performance Level required Determination	64
4.3	Applicazione del metodo	65
5	Conclusioni	69
	Acronimi	71
	Bibliografia	I

Abstract

Negli ultimi anni, i costi contenuti e la facilità di utilizzo hanno permesso una diffusione senza precedenti dei "droni", mezzi tecnologicamente avanzati in grado di scatenare una vera e propria rivoluzione tecnologica con applicazioni innovative in campo militare, civile e commerciale. La loro ampia diffusione, in così poco tempo, ha generato non poche sfide negli ambiti dell'affidabilità di questi mezzi e soprattutto della sicurezza durante il loro utilizzo. Il verificarsi di comportamenti inaspettati dovuti al sistema stesso o a fattori esterni può dar vita, infatti, a situazioni di grave pericolo per gli esseri umani e gli oggetti che si trovano all'interno della zona di sorvolo. Alla luce di ciò, il seguente lavoro si pone un triplice obiettivo: approfondire nel dettaglio la conoscenza degli "unmanned aerial vehicles" (UAVs) dal punto di vista storico, tecnico e normativo; esporre le caratteristiche principali delle tecniche di analisi RAMS che permettono di garantire l'affidabilità e la sicurezza di sistemi complessi; applicare alcune di queste tecniche per dimostrare la sicurezza del velivolo "Venture LE" all'interno di un contesto urbano dinamico. Le analisi sono state svolte utilizzando un approccio del tutto qualitativo basato su standard internazionali in grado di far emergere, in maniera chiara ed immediata, i rischi in cui si può incorrere durante l'utilizzo di un sistema UAV. L'obiettivo ultimo di questo studio è dunque quello di analizzare la sicurezza di un sistema complesso quale il "Venture LE", mettendo in luce punti di forza ed eventuali punti deboli su cui dover migliorare per poter garantire il più elevato livello di sicurezza possibile.

Capitolo 1

Uno sguardo generale sul mondo degli UAS

1.1 Storia e sviluppo di un'idea rivoluzionaria

Quando si pensa a quale possa considerarsi il primo UAV della storia umana, alcuni potrebbero erroneamente affermare che si tratti di una pietra lanciata da un uomo delle caverne durante la preistoria, oppure i fuochi d'artificio che vennero inventati in Cina durante il tredicesimo secolo. In realtà questi "velivoli" non permettevano alcun tipo di controllo da parte dell'uomo durante il loro volo, seguendo quella che è semplicemente una traiettoria balistica e, per questo motivo, non è corretto considerarli come i precursori del volo senza pilota. Volendo focalizzare l'attenzione su oggetti più pesanti dell'aria, in grado di generare portanza ed essere in qualche misura controllati dall'uomo durante il loro moto, allora il primo UAV della storia può essere considerato un oggetto che tutti durante la propria vita avranno utilizzato almeno una volta, ovvero l'aquilone! L'aquilone, difatti, permette all'utilizzatore di controllare a distanza, attraverso un filo, l'altitudine ed in minima parte la traiettoria dell'oggetto, che essendo più pesante dell'aria riesce a sostenersi in volo grazie alla genesi di portanza sulla superficie in tessuto.



Figura 1.1: Esempio del primo UAS della storia

1.1.1 Gli inizi

Secondo quanto riportato nell'opera di Fahlstrom e Gleason [9] il primo utilizzo di un velivolo senza pilota può esser fatto risalire al **1883** quando un uomo inglese di nome Archibald E. Douglas appese sotto al proprio aquilone un anemometro riuscendo così a misurare la velocità del vento ad un'altitudine di 365 metri. Successivamente, da vero pioniere dell'aria, il signor Archibald nel 1887 riuscì ad ottenere quello che si può considerare a tutti gli effetti il primo UAV da ricognizione della storia poichè, grazie a delle fotocamere posizionate lungo l'aquilone fu in grado di scattare alcune foto del territorio sottostante. Durante quello stesso anno pubblicò un articolo all'interno del quale grazie ai suoi esperimenti affermava che un vento di moderata forza fosse sufficiente non solo a deprimere considerevolmente i palloni aerostatici dalla verticale, ma fosse anche in grado di farli sobbalzare, ruotare e oscillare verticalmente e orizzontalmente in modo da renderli parzialmente inefficaci o totalmente inutili [7]. Durante la guerra Ispanico-Americana del 1898, il fotografo William Abner Eddy divenne famoso grazie ai suoi scatti fotografici dei campi di battaglia marittimi ottenuti attraverso una versione modificata di aquilone a diedro, aprendo così la strada all'utilizzo in campo militare degli UAV. Come spesso accade, infatti, è stato proprio l'ambito militare da quel momento in poi a garantire un forte impulso innovativo portando ad uno sviluppo continuativo delle tecnologie e delle soluzioni adottate per rendere i velivoli senza pilota dei mezzi affidabili da poter utilizzare sul campo.

1.1.2 Le due Guerre Mondiali

Fu proprio in concomitanza con lo scoppio della Prima Guerra Mondiale che gli eserciti di varie nazioni compresero le potenzialità dei sistemi senza pilota aprendo così ufficialmente un periodo di forte ricerca ed innovazione. Dopo 3 anni di ricerca e sviluppo, Charles Kettering diede vita ad un UAV Biplano destinato all'Army Signal Corps. dell'esercito americano. Questo biplano, denominato "**Kettering Aerial Torpedo**", era in grado di coprire una distanza di circa 70 chilometri ad una velocità di 90 km/h trasportando un carico di esplosivo pari a 180 kg. Tale velivolo era in grado di raggiungere la zona target attraverso dei controlli automatici impostati prima del decollo e, la particolarità che rese unico questo UAV, era la capacità di staccare le ali dalla fusoliera una volta giunto sull'obiettivo in modo così che la fusoliera con all'interno l'esplosivo potesse cadere al suolo come una convenzionale bomba. Un velivolo molto simile venne sviluppato in contemporanea da Lawrence Sperry su commissione della Marina Militare americana ma, nonostante i tanti voli di test di successo, esso non venne mai utilizzato attivamente durante la guerra.

Spesso quando si parla di pionieri del volo senza pilota si pensa a coloro i quali hanno sviluppato velivoli sempre più complessi ed efficienti ma, in realtà, nei primi anni del 1900 ha fatto la comparsa quello che potrebbe essere considerato il

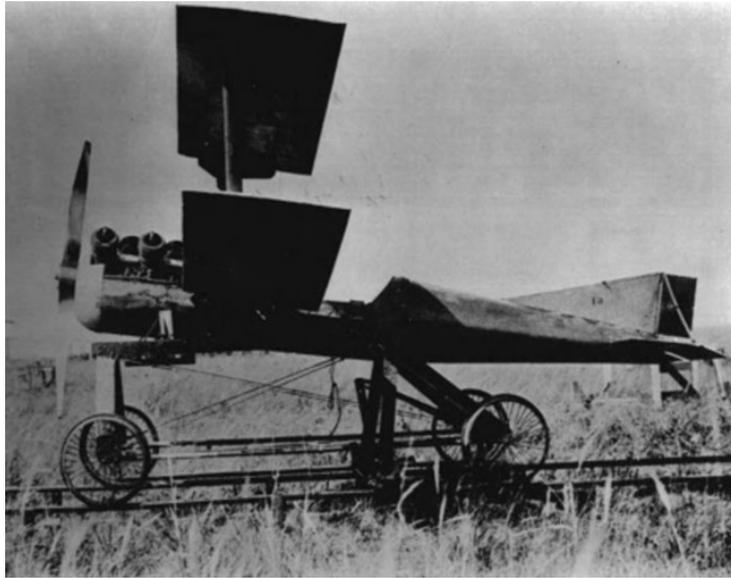


Figura 1.2: Immagine d'epoca del "Kettering Bug"

più importante dei pionieri degli UAV ovvero il Professor **Archibald Montgomery Low**, il quale sviluppò quello che viene definito in tempi odierni il **data link**, permettendogli così di ottenere l'appellativo di "Padre dei Sistemi a Radio Guida" [2]. Low si rivelò essere un ingegnere visionario, infatti, durante la sua vita, non si limitò ad inventare il primo collegamento dati della storia ma riuscì anche a risolvere i problemi di interferenza causati dai motori dei suoi UAV. Il 3 Settembre 1924 egli ottenne il riconoscimento per aver effettuato il primo volo radio-controllato della storia. Nel 1933, grazie al suo incessante lavoro, permise alla Gran Bretagna di ottenere un UAV in grado di non essere abbattuto dall'artiglieria dell'esercito. Alla soglia dello scoppio della Seconda Guerra Mondiale, il gruppo formato da Reginald Leigh Denny, Walter Righter e Kenneth Case fondarono la "Radioplane Company", una compagnia che da quel momento in poi produsse centinaia di Droni bersaglio come le serie RP-1, RP-2 e successive. L'utilizzo intensivo e particolarmente efficace di Sistemi UAV in questo periodo però si deve all'esercito tedesco, il quale migliorò notevolmente le idee di Archibald Low sviluppando alcune tra le armi più terrificanti della Seconda Guerra Mondiale, i temuti razzi V-1 e V-2 [6]. Le V-2 in particolar modo portarono il terrore nel cuore della Gran Bretagna infatti, la capacità di radio-controllo dei razzi da parte dei tedeschi divenne tale da permettere di colpire bersagli nel cuore di Londra sia di giorno che di notte, colpendo con facilità i target stabiliti poichè l'esercito inglese non era in possesso di sistemi in grado di arrestare in alcun modo questi razzi che piovevano dal cielo. Tuttavia il successo definitivo degli UAS si consolidò durante la Guerra del Vietnam dove vennero utilizzati con successo per missioni di intelligence (ricognizione) e guerra elettronica.

1.1.3 La Guerra del Vietnam

Durante il sanguinoso conflitto del Vietnam gli UAV vennero utilizzati ampiamente per missioni di ricognizione. Si trattava di sistemi lanciati in aria da C-130 appositamente modificati e venivano poi successivamente recuperati attraverso dei paracadute. Vennero sviluppati in maniera intensiva a partire dai droni bersaglio durante il periodo della Crisi dei missili di Cuba ma, a causa della brevissima durata della crisi, essi trovarono facilmente impiego nel conflitto asiatico svolgendo il ruolo di "deep penetrators". Uno dei contratti di maggior successo in questo periodo fu quello tra la Ryan Aeronautical e la United States Air Force, il quale diede vita al Ryan Model 147 Lightning Bug, un drone a reazione introdotto come "Reconnaissance RPV" (dove RPV sta per "Remotely Piloted Vehicle"). Grazie ad un afflusso di denaro continuo da parte delle casse dello Stato Americano, il design del Model 147 venne più volte modificato dando vita a numerose varianti, permettendogli di svolgere un elevato numero di missioni caratterizzate da ruoli specifici che richiedevano sistemi e sensori ad hoc per essere svolte. Essenzialmente si trattava di missioni sia ad alta che a bassa quota di ricognizione fotografica ed elettronica, sorveglianza, esca, guerra elettronica e guerra psicologica. In totale vennero effettuate 3.435 sortite e, la maggior parte di esse (2.873, circa l'84%), risultarono efficaci ed il velivolo venne recuperato con successo. Il record di sopravvivenza viene attribuito ad un velivolo denominato TOMCAT che fu in grado di compiere ben 68 missioni prima di essere abbattuto [23]. Successivamente, l'interesse internazionale nei confronti degli UAV rimase assopito fino a quando l'esercito Israeliano non fu in grado di neutralizzare il sistema di difesa aerea Siriano nella Valle di Bekaa nel 1982 utilizzando alcuni UAV da ricognizione e jamming. Nel frattempo, in America, la Lockheed Aircraft Company si era aggiudicata il contratto denominato "Systems Technology Demonstration" che permise di sviluppare in cooperazione con molteplici aziende un prototipo in grado di ottenere dei risultati a dir poco strabilianti durante le dimostrazioni di volo, accumulando oltre 300 ore di volo. Questi risultati permisero di firmare un successivo contratto di "Full Scale Engineering Development" (FSED) il quale diede il via al progetto più disastroso e fallimentare nella storia degli UAV, il progetto "Aquila". Tale progetto permise di ottenere ottimi risultati in termini di singoli componenti e sottosistemi ma si dimostrò essere fallimentare a causa della difficoltà di integrazione a livello di sistema tra le varie parti in gioco. Per questo motivo, nel 1984, venne avviato il programma "Gray Wolf", che in maniera diametralmente opposta al progetto Aquila, riuscì a sviluppare un sistema in grado di accumulare centinaia di ore di volo in operazioni notturne con condizioni che potrebbero essere considerate da combattimento.

1.1.4 Operazione Desert Storm

Fino alla fine degli anni 80 l'Aeronautica Militare Americana era fortemente riluttante riguardo l'utilizzo intensivo di UAS nonostante avessero accumulato una lunga esperienza e migliaia di ore di volo con tali sistemi. La situazione ha subito una brusca inversione di marcia durante gli anni 90 quando i nuovi vertici dell'Air Force decisero di spingere fortemente per lo sviluppo di nuove tecnologie, cercando di prendere il controllo di tutte le risorse stanziare per i progetti inerenti gli UAV in tutte le forze armate statunitensi. La Guerra del Golfo risulta essere uno spartiacque nella storia degli UAV poichè per la prima volta vennero utilizzati in maniera attiva durante i combattimenti. Durante il conflitto vennero utilizzati 5 differenti UAS: 1. Pioneer, 2. EX-Drone, 3. Pointer, 4. MART, 5. CL 89 Helicopter. Nonostante la varietà di sistemi impiegati, il ruolo degli UAV rimase comunque marginale senza spostare in maniera significativa gli esiti della guerra. Basti pensare che secondo quanto riportato all'interno di un rapporto della Marina statunitense, i Marines non aprirono mai il fuoco contro i target acquisiti dagli UAV durante le offensive di terra [15]. Di certo, l'operazione Desert Storm ha permesso di comprendere quali fossero le vere potenzialità dei sistemi UAV, garantendo così nuovi fondi e continui sviluppi.

1.1.5 Guerra in Bosnia ed Erzegovina

Le operazioni NATO durante il conflitto videro ancora una volta i sistemi UAV delegati a missioni secondarie di Sorveglianza e Ricognizione. Risultarono particolarmente utili le foto aeree scattate durante missioni notturne che permisero di ottenere immagini dettagliate delle infrastrutture bombardate. All'interno di tale teatro operativo fece il proprio debutto il Predator, uno degli UAV più famosi e riconosciuti in tutto il mondo. Al giorno d'oggi 6 esemplari risultano essere operativi presso l'AMI, mentre un settimo esemplare è stato abbattuto nel 2019 da un sistema di difesa aerea in Libia.



Figura 1.3: Predator in forza all'AMI

1.1.6 Guerre in Afghanistan ed Iraq

La guerra in Iraq ha consacrato in maniera definitiva gli UAV passando dall'essere dei potenziali sistemi d'arma ad effettivamente diventare dei sistemi d'arma fondamentali nelle tattiche degli eserciti grazie alle loro capacità multiruolo avanzate. Particolarità del conflitto è che anche alcuni UAV ancora in fase di sviluppo ottennero i permessi per partecipare attivamente al conflitto; il caso di maggior rilevanza è quello del Global Hawk il quale venne impiegato durante il primo anno di conflitto nonostante fosse ancora in una fase iniziale di sviluppo e validazione. Questo permise di ottenere una grande quantità di dati sperimentali sul campo, dando in questo modo la possibilità di migliorare considerevolmente le prestazioni del sistema. Per quanto riguarda sistemi invece già consolidati come il Pioneer, esso venne utilizzato centinaia di volte durante la Battaglia di Fallujah per individuare e marcare i bersagli da colpire, oltre che tenere traccia degli spostamenti delle forze insorgenti, avendo un impatto decisivo a tal punto da risultare una delle chiavi di svolta della guerra. Il Predator venne aggiornato alla versione armata, potendo così sganciare 2 missili Stinger o Hellfire.

1.1.7 Al giorno d'oggi

Con la conclusione dei principali conflitti a livello mondiale, la tecnologia inerente i velivoli senza pilota ha iniziato a diffondersi in maniera sempre più rapida in ambito civile, coinvolgendo dapprima Università ed Istituti di Ricerca, e, successivamente, l'intera popolazione mondiale. Sono nate una moltitudine di aziende specializzate nella produzione di UAS da impiegare in moltissimi ambiti, dall'agricoltura, al SAR fino alle semplici attività ludico-ricreative all'aperto. Ognuno di noi avrà visto almeno una volta volare quelli che comunemente vengono denominati "droni", ovvero dei velivoli multiruolo caratterizzati da un numero di bracci e di motori variabile. Una rassegna dettagliata dei possibili impieghi degli UAS e della regolamentazione in ambito civile richiesta a seguito della loro diffusione incontrollata negli scorsi anni sarà esaminata più avanti.



Figura 1.4: Multirotore Venture LE prodotto dalla ProS3

1.2 Nomenclatura e Classificazione

1.2.1 Acronimi e Nomenclature

Prendendo in considerazione tutte le tipologie di velivoli attualmente esistenti, fatta eccezione per razzi e missili, esistono essenzialmente **3** differenti tipologie di velivoli in grado di volare senza pilota:

- UAVs: Unmanned Aerial Vehicles.
- RPVs: Remotely piloted Vehicles.
- Drones.

La differenza sostanziale tra UAV ed RPV riguarda appunto le modalità con cui opera il velivolo. Nel caso di RPV esso deve essere sempre pilotato o controllato da una postazione remota a distanza mentre, nel caso dell'UAV, esso può essere pilotato a distanza ma è anche in grado di eseguire missioni in maniera del tutto autonoma oppure pre-programmate prima della partenza. Quindi in sostanza si potrebbe dire che gli RPV risultano essere una sotto-categoria di UAV in grado di svolgere esclusivamente missioni controllate a distanza istante per istante. In passato le tre differenti categorie ricadevano tutte sotto il nome di drone, utilizzato per indicare tutti gli aeroplani privi di pilota e controllati da radio segnali. Al giorno d'oggi, invece, il termine drone, tra gli esperti del settore, fa riferimento a tutti quei velivoli con limitata flessibilità nel compiere missioni sofisticate e che di conseguenza si ritrovano a volare in maniera piuttosto monotona e ripetitiva, come nel caso dei droni target. Sfortunatamente, però, questo termine si è ormai consolidato all'interno del linguaggio di tutti i giorni e per questo viene spesso utilizzato all'interno di articoli di giornale, servizi televisivi o pagine internet nonostante risulti essere tecnicamente errato per la definizione del soggetto in questione. Altre terminologie largamente diffuse ed utilizzate sono le seguenti:

- RPAS: Remotely-piloted Aircraft System (= SAPR: Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto).
- RPS: Remote Pilot Station (= GCS: Ground Control Station)
- RPA: Remotely Piloted Aircraft (= APR: Aeromobile a Pilotaggio Remoto)

Dunque, per quanto enunciato fino a questo momento, la definizione corretta più generale possibile per queste famiglie di velivoli può essere la seguente:

Aeromobile che opera o è progettato per operare autonomamente o essere pilotato a distanza, senza pilota a bordo e che possa essere riutilizzato.



Figura 1.5: Esempio delle varie tipologie di UAV possibili

1.2.2 Classificazione secondo il binomio accessibilità/tecnologia

Esistono differenti approcci per poter classificare la grande varietà di velivoli senza pilota a bordo attualmente presenti sullo scenario mondiale, ed una prima classificazione può essere quella che tiene in considerazione la semplicità con cui tale sistema risulta essere accessibile combinata alla tipologia di tecnologie che sono applicate sul velivolo a livello di componentistica, a livello strutturale e a livello software. Come è lecito aspettarsi, tanto più la tecnologia risulta essere avanzata e tanto più l'accessibilità a tali sistemi risulta essere prerogativa di enti militari dediti alla difesa del territorio nazionale. In quest'ottica, secondo quanto osservato da Kelley Saylor nel suo lavoro [20], è possibile individuare 4 differenti macro categorie che, partendo dai sistemi più semplici ed accessibili, arriva a sistemi di una complessità tale da essere completamente segretati, e sono in ordine crescente:

- UAS per Hobbisti
- UAS commerciali e militari di media grandezza
- UAS militari di grandi dimensioni
- UAS Stealth da combattimento

UAS per Hobbisti

La prima categoria, inerente l'ambito civile degli hobby, risulta essere quella con la maggior accessibilità in assoluto, infatti, chiunque può acquistare un UAV a cifre tutto sommato contenute, visto che i top di gamma raggiungono prezzi di qualche migliaio di euro. Si tratta di velivoli che vengono venduti già completamente o parzialmente assemblati e, la principale caratteristica che li contraddistingue dalle altre categorie, è che non necessitano di ground control station appositamente studiate bensì, sarà sufficiente uno smartphone o un tablet per poterli controllare o, in alternativa, un radiocomando commerciale. Solitamente presentano tecnologie che si attestano su standard commerciali, permettendo dunque un utilizzo dell'apparecchio limitato nella stragrande maggioranza dei casi ad ambiti ludico-ricreativi. La loro diffusione sul mercato ha ricevuto un forte impulso a partire dal 2011 quando i prodotti della *SZ DJI Technology Co.* e della *Parrot Sa* hanno iniziato a diffondersi a macchia d'olio tra gli appassionati del mondo del volo. I modelli di maggior successo sono dotati di un sistema GPS in grado di determinare con elevata precisione la posizione del velivolo in qualunque istante mentre, a livello software, permettono di impostare un punto di rientro verso cui il velivolo si dirigerà nel caso di perdita del segnale oppure se il livello batteria è troppo basso. Possono montare payload quali fotocamere e/o videocamere in grado di fornire immagini e video in tempo reale sullo schermo del dispositivo di controllo. L'utilizzo di fotocamere e videocamere "aeree" ha permesso l'accesso ad un numero praticamente illimitato di applicazioni da parte degli appassionati. In tempi recenti, visto il loro basso costo e l'elevata accessibilità, UAV di questa categoria sono stati utilizzati anche in maniera attiva all'interno di conflitti armati come nel caso del conflitto in Ucraina, in cui i soldati dell'esercito ucraino hanno utilizzato in maniera intensiva UAS per hobbisti con lo scopo di individuare le truppe russe nelle vicinanze. Viste le dimensioni ed il peso contenuti di questi velivoli, il problema principale che li caratterizza è la durata limitata della batteria, che solitamente si attesta intorno alla mezz'ora. Altre limitazioni rilevanti sono ovviamente il basso raggio d'azione, la mancanza di una trasmissione dati criptata sicura e la bassa capacità di carico.



Figura 1.6: DJI P4 Multispectral

UAS commerciali e militari di media grandezza

Nella seconda categoria rientrano un cerchia più ristretta, rispetto alla precedente, di sistemi in cui gli UAV presentano dimensioni e costi nettamente superiori e necessitano di infrastrutture apposite per il loro utilizzo. Queste caratteristiche rendono tali sistemi molto meno accessibili per i privati, riducendo il loro impiego in ambito civile per compiti da svolgere in condizioni particolarmente proibitive o che richiedano attrezzatura molto più sofisticata e pesante rispetto a quella che un semplice UAV per hobbisti possa trasportare. L'utilizzo di queste piattaforme molto spesso permette di evitare l'utilizzo di elicotteri, riducendo fortemente i costi di impiego ed utilizzo delle attrezzature. Ovviamente le maggiori dimensioni permettono di ottenere un'autonomia del velivolo nettamente superiore, potendo così coprire distanze considerevoli ben oltre il campo visivo del pilota/controllore a terra. Mediamente, infatti, velivoli appartenenti a questa categoria possono volare per oltre un'ora e ricoprire distanze nell'ordine della decina di chilometri. Tuttavia la principale limitazione di questi sistemi risulta essere la necessità di rimanere all'interno di comunicazioni *line of sight*, ovvero anche se il pilota non è più in grado di vedere il velivolo esso deve comunque essere raggiungibile in maniera diretta dal tipologie di payload che sono in grado di trasportare sono estremamente variegata, da sistemi di fotografia elettro-ottici, a sensori infrarossi, a carichi in campo militare di vario genere. Vista l'importanza che tali velivoli ricoprono per gli enti utilizzatori, le linee di trasmissione dati risultano essere molto spesso crittografate garantendo un livello di sicurezza durante lo svolgimento delle operazioni superiore. Lo stato dell'arte in questa categoria è rappresentato dal **Boeing Insitu ScanEagle**, un UAV MALE (Medium Altitude Long Endurance) che con un costo unitario di 3 milioni di dollari è in grado di garantire oltre 24 ore di autonomia in volo ad una quota di circa 6000 metri grazie ai suoi soli 22 kilogrammi di peso e una velocità di crociera di circa 110 km/h. ScanEagle è in grado di compiere missioni continuative ISR sia di giorno sia di notte in alcuni degli ambienti più estremi del pianeta grazie ad un'elevata flessibilità dovuta anche alla necessità di una semplice catapulta per il lancio mentre l'atterraggio avviene senza ruote ma con aggancio su "skyhook".



Figura 1.7: UAV ScanEagle caricato su sistema a catapulta

UAS militari di grandi dimensioni

Come suggerisce il nome attribuito a questa categoria, l'accessibilità a questa classe di sistemi è permessa in maniera esclusiva a personale militare altamente specializzato. I velivoli e le infrastrutture necessarie al loro utilizzo risultano essere estremamente complesse, in parte anche superiore rispetto qualsiasi altro velivolo militare o civile di grandi dimensioni. L'autonomia di questi velivoli supera di gran lunga le 24 ore permettendogli di percorrere anche decine di migliaia di chilometri trasportando payload fin oltre i 1.000 kilogrammi. A causa delle distanze percorse ben oltre la linea di vista, questi sistemi presentano velivoli di supporto per la comunicazione e la gestione dei dati. Sono in grado di penetrare all'interno di territori ostili per centinaia di chilometri senza dover ricorrere ad alcun tipo di comunicazione satellitare, risultando però particolarmente vulnerabili al rilevamento avanzato da parte dei sistemi nemici divenendo così facili bersagli per i caccia.

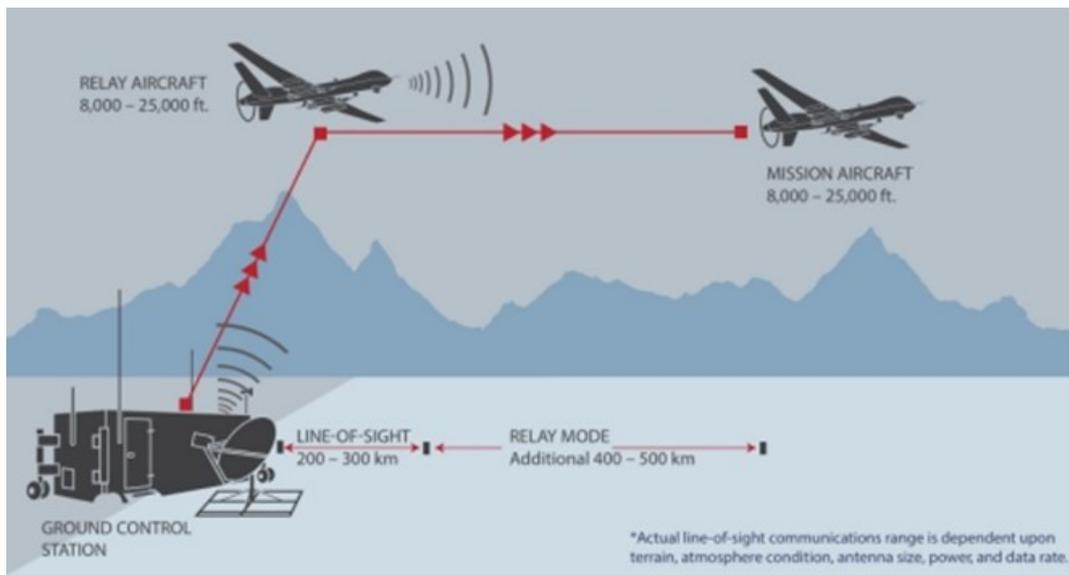


Figura 1.8: Sistema con velivolo "relay" di supporto

Senza ombra di dubbio il velivolo più rappresentativo di questa categoria è il **Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk**, un velivolo HALE ad elevate capacità di raccolta informazioni in grado di sondare ogni giorno un'area di circa 100.000 chilometri quadrati, l'equivalente circa dell'intera superficie dell'Islanda, attraverso un radar ad apertura sintetica (S.A.R.) ad alta risoluzione e attraverso sensori elettro-ottici/infrarosso (EO/IR). Il **General Atomics MQ-9 Reaper** è invece in grado di trasportare fino a 12 missili Hellfire oppure varie tipologie di bombe a guida laser.

UAS Stealth da combattimento

All'interno di questa categoria sono racchiusi pochissimi sistemi, massima espressione del genio umano e delle più avanzate scoperte tecnologiche in tutti gli ambiti coinvolti durante lo sviluppo e l'utilizzo di questi velivoli. Attualmente, gli Stati Uniti d'America risultano essere l'unico paese a possedere tali sistemi, ed il loro impatto strategico come arma deterrente nei confronti delle nazioni ostili, grazie alle loro avanzatissime capacità di occultamento stealth, permette di comprendere facilmente come mai molti paesi tecnologicamente avanzati stiano lavorando ed investendo ingenti somme di capitale per sviluppare i propri UAS Stealth da combattimento. Anche in questo caso si ha a che fare con UAV armati e ISR dalla complessità paragonabile a quella dei caccia odierni di quinta generazione (vedasi l'F-35). Il livello di segretezza riguardo tali sistemi è tale che nonostante alcuni di essi siano entrati in servizio attivo da ormai una decina d'anni, poco o nulla è noto riguardo le tecnologie implementate ma anche addirittura riguardo geometrie e dimensioni. I due principali UAV attualmente in forza alle truppe americane sono:

- *Lockheed Martin RQ-170 Sentinel*
- *Lockheed Martin RQ-180*

Entrambi i velivoli sono progettati per ridurre al minimo la traccia radar attraverso superfici e materiali appositamente studiati per ridurre al minimo la riflessione radar. Come per velivoli stealth convenzionali, anche in questo caso è stata scelta la configurazione ad ala volante, senza alcun tipo di superficie verticale di controllo. Apparte questo, come già anticipato, quasi nulla è noto riguardo i sensori e la componentistica presenti all'interno di questi sistemi. A livello europeo il progetto di maggior interesse per un UAS Stealth è il progetto **nEUROn** che vede come società coinvolte nel progetto e nella costruzione la francese Dassault Aviation e l'italiana Leonardo.



Figura 1.9: Rendering grafico del RQ-170 Sentinel

1.2.3 Tassonomia NATO

La forte diffusione nell'ultimo decennio di tali sistemi e apparecchiature ha creato non poche difficoltà ai vari enti governativi ed internazionali nel trovare una corretta suddivisione tra le varie categorie di sistemi. Dopo un periodo iniziale di incertezza si è arrivati a convergenza concordando in linea di massima che la metodologia migliore fosse quella di suddividere le varie classi di appartenenza a seconda del peso del mezzo UAV utilizzato. Così è stata sviluppata una suddivisione ad alto livello da parte della NATO che riconosce 3 differenti classi: la prima riguarda i velivoli con peso inferiore ai 150 kg, la seconda riguarda i velivoli tra i 150 kg ed i 600 kg, mentre l'ultima riguarda i velivoli di peso maggiore. Nel 2015 la *Military Aviation Authority* del governo Britannico ha rilasciato un documento [5] in cui la Classe I NATO viene ulteriormente partizionata in quattro differenti categorie identificate dalle lettere *a b c d* a seconda del peso. I **NANO** UAV, Classe I (**a**), presentano peso inferiore ai 200 grammi; i **MICRO** UAV, Classe I (**b**) un peso non superiore ai 2 kg; i **MINI** UAV, Classe I (**c**), un peso compreso tra i 2 kg ed i 20 kg; gli **SMALL** UAV, Classe I (**d**) un peso superiore ai 20 kg ma comunque inferiore al limite dei 150 kg della Classe I. Questa suddivisione è stata ben presto adottata in varie parti del mondo, divenendo al giorno d'oggi la tassonomia comune più diffusa ed utilizzata sia tra gli appassionati sia all'interno di documenti ufficiali.

MTOW	Classi NATO	Tassonomia Comune	Categoria MAA iniziale
<200g	Classe I <150 kg	NANO	Classe I (a)
200g - 2kg		MICRO <2kg	Classe I (b)
2kg - 20kg		MINI 2-20 kg	Classe I (c)
20kg - 150kg		SMALL >20 kg	Classe I (d)
> 150kg	Classe II 150 - 600 kg	TACTICAL >150 kg	Classe II
>600kg	Classe III > 600 kg	MALE / HALE / STRIKE	Classe III

Figura 1.10: Tassonomia Classi NATO ed affini

1.2.4 Classificazione secondo peso/dimensione

Riprendendo alcuni dei termini presentati nella tassonomia della sezione precedente, si riportano di seguito una lista delle principali categorie di UAV in ordine crescente per dimensioni e peso:

- **NANO UAV:** si tratta di velivoli dalle dimensioni estremamente ridotte, pari ad alcuni grossi insetti. Le dimensioni ridotte permettono il loro impiego come velivoli da spionaggio e per quanto riguarda la capacità di sostentamento esistono due differenti soluzioni possibili: la prima utilizza dei classici motori elettrici brushless di dimensioni ridotte come nel caso del *Black Hornet PD-100 PRS*, mentre la seconda utilizza le cosiddette "flapping wings", un sistema di ali oscillanti in grado di riprodurre il volo di uccelli ed insetti;



Figura 1.11: Black Hornet PD-100



Figura 1.12: Darpa Nano UAV

- **MICRO UAV:** detti anche "*Micro Air Vehicle* (MAV) presentano solitamente un peso di circa un kilogrammo. Hanno una lunghezza media compresa tra i 30 e di 50 cm, e rappresentano il compromesso perfetto per gli hobbisti di tutto il mondo. Dimensioni e velocità contenute, infatti, permettono il loro utilizzo anche in molte zone urbane garantendo un rischio per la sicurezza contenuto. La configurazione classica maggiormente diffusa sul mercato è quella del multirottore, nello specifico è il quadrirotore. Essi possono essere facilmente trasportati da una singola persona ed hanno un raggio d'azione di qualche centinaio di metri (al massimo un paio di chilometri);
- **MINI UAV:** Questa categoria racchiude tutti quei velivoli con un peso compreso tra i 2 ed i 20 kg. Le dimensioni possono raggiungere ed addirittura superare il metro di lunghezza ed/o apertura alare. Ne consegue che molti velivoli abbandonano la configurazione di multirottore convenzionale permettendo così l'utilizzo di configurazioni ad ala fissa più tradizionali. Alcuni tra i velivoli più complessi ed avanzati presentano addirittura una configurazione Convertiplano, in cui coesistono l'anima multirottore e quella ad ala fissa. Questo è il caso dell'UAV **ICON V2**, un gioiello di altissima tecnologia prodotto dall'azienda italiana **ProS3**. Entrando nel dettaglio, il passaggio da

volo a punto fisso a volo traslato avviene attivando il motore di spinta e, superata la velocità minima di volo, spegnendo progressivamente i motori di sostentamento. Viceversa, il passaggio da volo traslato a volo a punto fisso avviene spegnendo il motore di spinta, assumendo un assetto cabrato per frenare e, all'approssimarsi della velocità minima di volo, attivando i motori di sostentamento;



Figura 1.13: Modello ICON V2 prodotto dall'azienda ProS3

- **SMALL UAV:** Si tratta essenzialmente di un upgrade dei velivoli appartenenti alla categoria precedente. Con dimensioni maggiori ed un peso massimo di 150 kg, permettono di trasportare sensori ed attrezzature ad elevate prestazioni. Rappresentano inoltre il limite ultimo per apparecchiature destinate al mercato civile, poichè dimensioni e pesi maggiori tutt'ora risultano essere prerogativa unica delle forze armate, a causa dell'elevato rischio per la sicurezza durante il loro utilizzo.
- **TACTICAL UAV:** I TUAV generalmente presentano un peso medio di 300 kg, raggiungono quote operative comprese tra i 1.000 ed i 5.000 metri, con autonomie di volo di diverse ore. Il loro controllo avviene sempre all'interno della VLOS, ovvero la *Visual Line of Sight*, il volo a vista. Risultano essere sistemi troppo grandi per essere trasportati da una sola persona, ma ancora più piccoli di un velivolo dell'aviazione generale. Un classico esempio di tactical UAV risulta essere il Pioneer oppure l'israeliano Hunter.
- **LARGE UAV:** L'ultima categoria racchiude i velivoli più grandi e pesanti che siano mai stati prodotti. La complessità di questi sistemi è di gran lunga superiore ai precedenti e ne è la dimostrazione il fatto che possano operare in BVLOS, ovvero in *Beyond Visual Line Of Sight*, oltre il volo a vista. Massima espressione di questa categoria è il già citato Global Hawk.

1.3 Architettura dei moderni UAS

Al giorno d'oggi, ogni UAS deve essere costituito da un set minimo di componenti e sottosistemi tali da garantirne la sustentazione in volo, il governo ed il controllo a distanza. Escludendo i velivoli di grandi dimensioni che risultano essere molto più complessi ed articolati, un moderno UAS di piccole e medie dimensioni deve possedere i seguenti sistemi affinché possa alzarsi in volo ed essere controllato:

- **sistema di sustentamento:** nel caso si tratti di sistemi ad ala fissa ci si riferisce alle superfici portanti, mentre nel caso di sistemi ad ala rotante e multicotteri si tratta delle eliche;
- **sistema di propulsione:** per velivoli di dimensioni rilevanti è possibile utilizzare i sistemi tradizionali di propulsione, mentre nel caso di UAS di piccole e medie dimensioni si è soliti utilizzare sistemi ad elica mossi da motori elettrici brushless;
- **sistema di fornitura energetica:** ogni sistema di propulsione ovviamente richiede una fonte di energia dalla quale ricavare la spinta necessaria al volo. Nel caso di velivoli provvisti di motori a combustione si ha un sistema formato da serbatoi, pompe e valvole mentre, nel caso di velivoli con motori elettrici, si hanno essenzialmente delle batterie collegate direttamente all'ESC (Electronic Speed Controller);
- **sistema di controllo:** cuore pulsante del velivolo, è il sistema predisposto al controllo dei sistemi di sustentamento e propulsione garantendo la corretta esecuzione delle operazioni in volo;
- **sistema di ricezione/trasmisione:** di base il radiocomando utilizzato dall'operatore a terra invia i comandi di governo per mezzo di un'antenna trasmittente mentre sul velivolo è installata un'antenna collegata ad un ricevitore che elabora l'informazione e la trasferisce al sistema di controllo;
- **sistema di navigazione e controllo:** si tratta della scheda madre installata all'interno dell'UAV e svolge il compito di elaborare tutti i segnali di input provenienti dal pilota e dai sensori e di trasformarli in comandi per il sistema di propulsione per mezzo dell'ESC;
- **sistema di sensoristica:** all'interno troviamo tutti quei componenti di sensoristica che permettono di conoscere la quota, la posizione, l'assetto, la velocità e l'eventuale presenza di ostacoli. In altre parole si tratta di quell'insieme di giroscopi, altimetri, GPS, accelerometri, sensori di rilevamento ostacoli etc. che permettono il volo stabile e controllato del velivolo;

- **payload:** tipicamente il payload non svolge un ruolo fondamentale per il sostentamento del velivolo, ma viene comunque annoverato tra i sistemi essenziali poichè è quello che garantisce lo svolgimento della missione per la quale il sistema viene impiegato. Le tipologie di payload installati negli UAV possono variare fortemente a seconda della missione a cui il velivolo è destinato ma, in molte applicazioni civili, esso consiste in una videocamera installata nella parte ventrale del velivolo attraverso un supporto fisso oppure un giunto cardanico (detto Gimbal);
- **Stazione di terra:** all'interno della Ground Control Station sono presenti il radiocomando per il controllo del velivolo ed i sistemi dedicati alla ricezione e l'elaborazione dei dati provenienti dal payload. Essi possono essere un semplice smartphone, un tablet oppure un sistema complesso appositamente progettato per lo scopo.

L'immagine sottostante rappresenta la classica architettura di un quadricottero elettrico provvisto di videocamera.



Figura 1.14: Esempio di architettura UAS

Si analizzano ora nel dettaglio i vari sistemi e componenti presenti.

1.3.1 Telaio

Nel caso dei multicotteri, il telaio rappresenta la struttura che supporta tutti gli altri componenti. I materiali utilizzati risultano essere l'alluminio aeronautico, la fibra di carbonio, l'ABS e raramente la fibra di vetro. La configurazione classica prevede 4 bracci disposti ad X protrarsi verso l'esterno ma, negli anni, sono state proposte moltissime configurazioni, che possono arrivare a coinvolgere fino ad 8 o più bracci. Idealmente le estremità dei bracci vengono disposte lungo una circonferenza con centro in corrispondenza del centro di gravità del velivolo. Tuttavia, poichè è il software a controllare l'assetto del velivolo, è possibile variare tali distanze in maniera da evitare possibili fenomeni di interferenza.

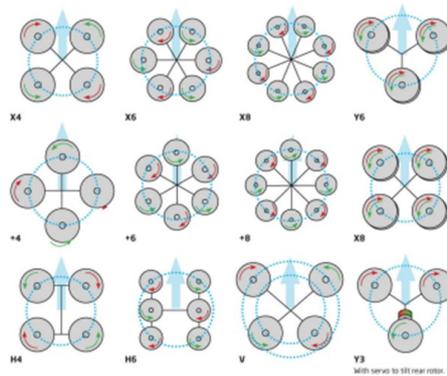


Figura 1.15: Schema riassuntivo delle principali configurazioni possibili

1.3.2 Batterie

Le batterie più utilizzate per gli UAS sono le **LiPo** (Litio-Polimero) grazie alla loro capacità di immagazzinare energia al costo di volumi e pesi accettabili. Una batteria LiPo è composta da una o più celle, ognuna delle quali produce una potenza nominale di 3.7 volts (quindi nel caso di 3 celle avremo un totale di 11.1 volts). La capacità di immagazzinamento della batteria è espressa in mAH (milliamper per ora), mentre la velocità di scarica è espressa attraverso due numeri come ad esempio 25C/35C. Il valore inferiore rappresenta la velocità di riferimento, mentre il valore superiore indica la condizione di "burst rate" che può essere sostenuta solo per alcuni secondi. Nel caso di batteria multicella è necessario utilizzare un "balance charger" in grado di monitorare lo stato di ogni singola cella attraverso un connettore apposito detto "balance plug". Le batterie LiPo devono infine essere maneggiate con cura, poichè possono prender fuoco facilmente e per questo motivo è consigliabile caricarle all'interno di un *LiPoSafetyBag*.

1.3.3 Motori

Come anticipato, i motori installati su molti UAV sono motori elettrici brushless. Essi sfruttano magneti permanenti e non hanno bisogno di contatti elettrici striscianti per poter funzionare. Questi vantaggi permettono ai motori anche di piccole dimensioni di raggiungere velocità oltre gli 8000 rpm. Inoltre permettono delle variazioni di velocità estremamente rapide grazie al sistema di controllo elettronico. Si tratta di una tecnologia altamente efficiente che presenta un solo grande limite di utilizzo: le temperature. I motori brushless, infatti, presentano elevate prestazioni solo all'interno di range di temperatura ristretti, con perdite di prestazioni elevate non appena fuori da tali limiti. Una pratica abbastanza comune è quella di scegliere i motori in maniera tale che la loro spinta complessiva sia pari a circa il doppio del peso del nostro velivolo, così da ottenere un eccesso sufficiente di spinta per poter effettuare la salita ed altre manovre.



Figura 1.16: Motori elettrici brushless

1.3.4 Eliche

I motori elettrici sono solo una parte dell'equazione, infatti per mettere correttamente in volo l'UAV è necessario scegliere anche le corrette eliche da utilizzare. Esse possono essere realizzate in legno, fibra di carbonio o ABS e risultano essere uno dei componenti critici del sistema. Nel momento in cui emergono segni di usura oppure piccolissime crepe è obbligatorio sostituirle con un set di eliche nuove, in modo da non compromettere la missione e soprattutto mettere in pericolo il personale circostante. Possono essere di due tipi: (1) Destorse ruotano in senso orario; (2) Sinistrorse ruotano in senso antiorario. Questa differenza è molto importante nei multicotteri a causa delle dissimetrie. La coppia motrice sviluppata da un motore genera sulla struttura una coppia uguale e di segno opposto che deve essere compensata e questo è possibile facendo in modo che preso un motore elettrico, quelli adiacenti dovranno presentare eliche che ruotano in senso opposto.

1.3.5 Electronic Speed Controller

L'ESC riceve in ingresso la corrente proveniente dalla batteria e i comandi dell'autopilota e fornisce in output, grazie al lavoro di un microchip integrato, la corrente trifase in grado di regolare la velocità di rotazione dei motori brushless. Questo controllore deve essere scelto con cura, facendo particolare attenzione al massimo valore di Amperes che è in grado di gestire. Se i motori richiedono 30A allora l'ESC dovrà avere una capacità di almeno 33A tenendo conto di un margine di circa il 10% rispetto al valore nominale. Per mantenere l'assetto di volo, l'autopilota modifica la velocità dei singoli motori dalle 400 alle 500 volte al secondo.



Figura 1.17: Schema di collegamento dell'ESC

1.3.6 Autopilota

L'autopilota, o controllore del volo, è il "cervello" del nostro velivolo. Esso è composto da una scheda con un microprocessore programmabile che svolge il compito fondamentale di stabilizzare e controllare il velivolo, ma anche di gestire il volo in diverse modalità (Automatica, Semiautomatica e Manuale) e di memorizzare operazioni di volo con comandi pre-programmati. Attraverso una serie di porte di ingresso riceve i segnali provenienti dai sensori, dall'antenna ricevente, dal gps e genera in uscita i segnali di controllo per l'ESC ed i motori. Esistono due differenti scuole di pensiero riguardo la struttura di un autopilota: (1) la prima prevede un sistema chiuso come nel caso dei sistemi DJI mentre, (2) la seconda prevede un sistema open-source come nel caso di OpenPilot o ArduPilot che può essere di volta in volta aggiornato e migliorato dalla comunità che li utilizza. Oltre il microprocessore, sulle schede moderne sono installate anche le cosiddette *IMU "Inertial Measurement Unit"*, dispositivi in grado di fornire molti dei dati necessari all'autopilota per controllare il velivolo. Al suo interno, infatti, sono presenti sensori come l'accelerometro, il giroscopio, la bussola, il barometro ed il magnetometro.

1.3.7 GPS

Il *Global positioning system* è un sistema di navigazione basato su architettura satellitare ed è in grado di calcolare con precisione la posizione del velivolo su cui

è installato. Attraverso una triangolazione dei segnali provenienti dai satelliti che ricoprono la zona di volo, il GPS permette all'UAV di raggiungere i *Waypoint* impostati per la missione, di rimanere fisso in una specifica posizione oppure di rientrare autonomamente al punto di decollo. Solitamente il suo funzionamento è accoppiato a quello di un magnetometro a 3 assi, il quale funge da bussola andando a calcolare le 3 componenti del campo magnetico terrestre fornendo l'informazione riguardo l'orientazione della prua del velivolo.

1.3.8 Power Management Unit

La PMU svolge il compito di distribuire in maniera corretta la corrente elettrica proveniente dalla batteria alle varie componenti elettroniche presenti all'interno dell'architettura.

1.3.9 DataLink

Il sistema DataLink si occupa della trasmissione a terra dei dati telemetrici e di eventuali immagini/video in tempo reale. Esso è in grado di trasmettere dati come lo stato della batteria, l'altitudine e tutte quelle informazioni che caratterizzano le prestazioni del velivolo. Utilizza solitamente la frequenza di 2.4 GHz ed è un componente obbligatorio nel caso di operazioni "specific". Questo sistema può essere separato presentando un suo device specifico a terra oppure essere integrato all'interno della trasmettitrice/ricevente.

1.3.10 Trasmittitrice e Ricevente

La ricevente è un'antenna montata a bordo del velivolo che trasmette in maniera rapida le informazioni riguardanti i comandi provenienti dalla trasmittente a terra. Il mercato attualmente è dominato dai *Radio Comandi "RC"*, nonostante esistano anche soluzioni Wi-Fi. Essi sono caratterizzati dal numero di canali che hanno a disposizione, infatti, ogni canale è in grado di controllare un aspetto del volo. I modelli base presentano almeno 4 differenti canali, ognuno deputato ad una componente del moto differente: verticale, rotazione, avanti/indietro, movimenti laterali. Altri canali aggiuntivi permettono di selezionare le differenti modalità di volo oppure a comandare servo meccanismi. Come detto, al giorno d'oggi molti di questi apparecchi sono anche in grado di ricevere i dati telemetrici.

1.3.11 Cablaggi

La scelta dei cablaggi è fondamentale per non incorrere in possibili failure dell'apparecchio dovute ad esempio ad un'errata alimentazione dei componenti.

1.4 Regolamentazione ed ambiti di utilizzo

1.4.1 Enti Aeronautici

Affinchè il funzionamento del traffico aereo avvenga in maniera efficiente e sicura, bisogna tener conto dell'interazione tra tre differenti componenti: la componente "umana" (piloti, controllori di volo, manutentori), il velivolo e l'ambiente. Queste interazioni risultano essere molto complesse ed è per questo motivo che la regolamentazione aeronautica svolge il fondamentale compito di garantire che queste interazioni avvengano in maniera codificata attraverso norme e procedure stringenti. L'obiettivo è quello di garantire il più elevato livello di sicurezza (safety) possibile durante lo svolgimento delle attività aeree. L'organizzazione degli enti preposti alla stesura e al controllo del rispetto di queste norme e procedure è di tipo piramidale. Al vertice troviamo l'ICAO e poi a scalare agenzie internazionali come la FAA e l'EASA mentre, ai livelli più bassi, si trovano gli enti e le agenzie territoriali dei singoli Stati. Verranno ora illustrate in maniera sintetica quali sono le organizzazioni che esercitano la propria autorità in materia di UAS sul territorio Italiano.

1.4.2 ICAO



L'*International Civil Aviation Organization* costituisce l'organo di riferimento per le norme di tutte le autorità aeronautiche che vi aderiscono. Ufficialmente è stata fondata il 7 Dicembre 1944 con la firma della Convenzione di Chicago ed attualmente gli Stati membri che hanno aderito a tale Convenzione sono 193. Essa si compone di 96 articoli suddivisi in 4 parti:

- Air Navigation;
- The International Civil Aviation Organization;
- International Air Transport;
- Final Provision.

L'obiettivo della Convenzione di Chicago è quello di definire norme comuni, che tutti i firmatari dovranno seguire, e che risultano essere raccolte sotto forma di 19 Annessi costituiti a loro volta da 2 tipologie di norme:

- **Standard:** risultano essere norme essenziali per la sicurezza e la regolarità della Navigazione Aerea Internazionale, per questo motivo devono essere **obbligatoriamente** applicate da tutti gli Stati membri in maniera uniforme.
- **Raccomandazioni:** la loro applicazione uniforme è desiderabile ma non strettamente obbligatoria, garantendo una maggior sicurezza, regolarità ed efficienza della Navigazione Aerea Internazionale.

1.4.3 EASA



L'*European Aviation Safety Agency*, istituita nel 2002, è l'Agenzia Europea per la sicurezza aerea e svolge il compito fondamentale di garantire la **sicurezza** e la **protezione ambientale** del trasporto aereo in Europa. I suoi principali ruoli e compiti da svolgere sono i seguenti:

- Proporre alla Commissione Europea le bozze di Regolamenti sulla Sicurezza Aerea sotto forma di proposte;
- Assolve agli obblighi richiesti dalla Convenzione di Chicago;
- Esegue ispezioni su Stati membri ed imprese;
- Emette AMC e materiale di guida relativamente ai Regolamenti adottati dalla commissione;
- Emette le Prescrizioni di Aeronavigabilità;
- Omologa i prodotti aeronautici;
- Certifica le imprese di progettazione (DOA) e le imprese di costruzione e manutenzione ubicate in Stati non UE;
- Sviluppare il mercato unico dell'aviazione dell'UE.

1.4.4 ENAC



L'*Ente Nazionale per l'Aviazione Civile* è stato fondato in Italia con il D.lgs. N. 250 del 25/7/1997, si tratta dunque di un ente pubblico avente funzioni di regolamentazione tecnica, attività ispettiva, sanzionatoria, di certificazione, autorizzazione, coordinamento e controllo.

Le principali responsabilità dell'ENAC possono essere riassunte come segue:

- Regolamenti Nazionali, ispezioni e sanzioni riguardanti la produzione, le operazioni e la manutenzione relativi agli aeromobili civili;
- Approvazione del progetto e certificazione di tipo per conto dell'EASA;
- Aeronavigabilità Continua;
- Rilascio delle licenze e certificazione del personale;
- Regolamentazione dello Spazio Aereo, degli Aeroporti e dei Servizi a Terra;
- Approvazione degli investimenti e dei piani di sviluppo per le infrastrutture aeronautiche.

1.4.5 ENAV



L'*ENAV* è la società a cui lo Stato Italiano ha affidato la gestione ed il controllo del traffico aereo civile in Italia. L'azienda è controllata dal Ministero dell'Economia e delle Finanze ed è vigilata dal Ministero delle Infrastrutture dei Trasporti, garantendo un servizio continuativo di controllo del traffico aereo e altri servizi di assistenza alla navigazione, come ad esempio la *Meteorologia* o la *Cartografia Aeronautica*.

1.4.6 ANSV

L'*Agenzia Nazionale per la sicurezza del Volo*, sotto la vigilanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri, è l'*autorità investigativa per la sicurezza dell'aviazione civile dello Stato Italiano*.

1.4.7 Regolamentazione in vigore

In Italia, anticipando i tempi rispetto a molti altri Paesi, la prima Normativa sui Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR) è stata emessa da parte dell'ENAC già nel 2018 attraverso il "*Regolamento Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto*" rilasciato con Ed.2 Em.4 del 21/05/2018. Tale Normativa Nazionale è ufficialmente decaduta il 31 Dicembre 2020 quando è entrato in vigore il **Regolamento di Esecuzione (UE) n. 2019/947**, redatto da EASA e relativo a norme e procedure per l'esercizio degli aeromobili senza equipaggio sul territorio europeo. L'obiettivo è quello di garantire la libera circolazione degli UAV all'interno dell'Unione Europea, applicando gli stessi standard di sicurezza utilizzati nei voli civili con equipaggio. Attraverso uno studio del rischio relativo al funzionamento del velivolo, sono stati stabiliti degli obblighi che i produttori e gli operatori devono rispettare in termini di sicurezza, ambiente e rispetto della privacy affinché sia garantito un certo equilibrio. Tale Regolamento lascia comunque alcune libertà di autogestione ai singoli Stati membri ed è per questo motivo che l'ENAC, ha pubblicato, in data 4 Gennaio 2021, il **Regolamento UAS-IT**, il cui scopo è quello di (si riporta di seguito un breve estratto dell'Art.3 del Regolamento):

- completare il quadro giuridico del Regolamento (UE) n. 2019/947 per le parti per cui tale Regolamento rimanda a disposizioni nazionali;
- definire i requisiti applicabili agli UAS privati o di Stato che conducono attività che ricadono nelle previsioni dell'articolo 2 comma 3 a) del Regolamento (UE) 2018/1139 ma per i quali le competenti Amministrazioni dello Stato non abbiano emesso speciali regolamentazioni di cui all'articolo 748 del Codice della Navigazione.

Il Regolamento di Esecuzione 2019/947 suddivide le operazioni con gli UAS in 3 differenti categorie:

- **Categoria OPEN:** racchiude tutte quelle operazioni che non richiedono autorizzazione operativa preventiva nè alcuna dichiarazione operativa da parte dell'operatore UAS prima dell'inizio della stessa;
- **Categoria SPECIFIC:** tali operazioni necessitano di un'autorizzazione operativa rilasciata dall'autorità competente oppure di un'autorizzazione;
- **Categoria CERTIFICATE:** categoria con la più elevata classe di rischio, richiede l'obbligo di certificazione dell'UAS a norma del *Regolamento Delegato (UE) 2019/945*, di certificazione dell'operatore e della licenza del pilota remoto (se presente).

All'interno dell'Allegato A relativo al Regolamento, vengono stabilite le norme e procedure relative alle categorie open e specific. In breve esse possono essere riassunte come segue:

Categoria OPEN A1

Il MTOM deve essere inferiore a 250 gr, le operazioni devono avvenire in VLOS e non è consentito il sorvolo di assembramenti sia che si tratti di personale coinvolto nelle operazioni sia di persone non coinvolte. Distanza massima dalla superficie terrestre (AGL) pari a 120 m. Il velivolo deve essere assicurato e l'operatore deve possedere un attestato di competenza oltre che risultare registrato sul sito D-flight. Nessuna dichiarazione necessaria.

Categoria OPEN A2

Il MTOM deve essere inferiore a 4 kg, le operazioni devono essere svolte in VLOS e bisogna garantire che il volo avvenga ad una distanza di sicurezza di almeno 30 metri da assembramenti di persone non coinvolte. AGL pari a 120 m. Il velivolo deve essere assicurato e l'operatore, oltre ad un attestato di competenza, deve essere in possesso di un ulteriore riconoscimento attestante l'addestramento pratico. Il velivolo deve essere assicurato e l'operatore registrato sul sito D-flight. Nessuna dichiarazione necessaria.

Categoria OPEN A3

IL MTOM deve essere inferiore a 25 kg, le operazioni devono essere svolte in VLOS. Il volo deve essere effettuato ad una distanza di sicurezza di 150 m da zone residenziali, commerciali, industriali. AGL pari a 120 m. Il velivolo UAV deve essere assicurato, l'operatore deve possedere un attestato di competenza oltre che risultare registrato sul sito D-flight. Nessuna dichiarazione necessaria.

Categoria SPECIFIC STANDARD SCENARIO

Esistono due differenti categorie: la **STS-01** riguarda operazioni specifiche VLOS in area **popolata/urbana**. Le persone all'interno dell'area sorvolata devono essere informate dei rischi e ricevere istruzioni operative. MTOM inferiore a 25 kg, AGL pari a 120 m, l'operatore deve aver conseguito corsi specifici e deve dichiarare l'operazione di volo attraverso il sito D-flight. La **STS-02** riguarda operazioni specifiche **BVLOS** in **area scarsamente popolata**. L'operazione deve essere svolta su area controllata con prescrizioni variabili a seconda che ci siano o meno osservatori dello spazio aereo. I requisiti coincidono con quelli della STS-01.

Categoria SPECIFIC NON-STANDARD SCENARIO

A causa delle condizioni non standard, è necessario presentare il SORA (Specific Operations Risk Assessment) ed adempiere a tutte le prescrizioni del *Permit to Fly*.

1.4.8 Missioni ed ambiti di utilizzo

Definire le possibili missioni di un UAS è impresa alquanto ardua e sono due i motivi che concorrono a ciò: il primo, come è emerso dalla trattazione fino ad ora compiuta, è che esiste una grande varietà di possibilità al giorno d'oggi sugli utilizzi di questi sistemi; la seconda riguarda, invece, il progresso e lo sviluppo continuo di nuove tecnologie in grado di trovare applicazioni innovative all'interno dell'universo UAS, facendo così comprendere come la potenzialità di utilizzo sia pressochè infinita per questi sistemi. Di certo, la suddivisione più ovvia si ha separando i due ambiti Militare e Civile. Di seguito si riportano due brevi liste delle principali missioni nei due ambiti.

Missioni Militari

In campo militare sono molteplici gli ambiti di utilizzo [13]:

- **Intelligence, Surveillance and Reconnaissance**
- **Lethal Weapons**
- **Nonlethal Weapons**
- **Communications Relay**
- **Electronic Warfare**
- **Signals Intelligence**
- **Psychological Operations**
- **Aerial Targets**
- **Maritime Surface Warfare**
- **Antisubmarine Warfare (ASW)**
- **Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear Detection/Sampling**
- **Cargo Delivery**
- **System Emplacement**
- **Counterimprovised Explosive Devices (C-IED), Unexploded Ordinance (UXO) Detection, and Landmine Detection**
- **Casualty Evacuation (CASEVAC)**
- **Helicopter Support**

Missioni Civili

Per quanto riguarda le missioni civili sono invece possibili due macro ambiti di utilizzo ovvero (1) **Missioni Scientifiche e di Ricerca** e (2) **Missioni Commerciali e Civili**. Entrambe le situazioni prevedono un gran numero di applicazioni possibili che possono essere riassunte brevemente come segue.

Missioni Scientifiche e di Ricerca

Come facilmente intuibile dal nome, queste missioni si pongono l'obiettivo di raccogliere dati ed effettuare esperimenti affinché il sapere umano possa continuare a progredire. L'utilizzo di UAS permette di svolgere missioni ad elevato tasso di rischio riducendo al minimo i rischi per la vita dell'uomo, cosa che non sarebbe possibile invece nel caso di velivoli con pilota a bordo. Si possono avere:

- **Missioni di Scienze della Terra:** uno dei principali utilizzi degli UAS riguarda lo studio dei cambiamenti climatici in atto e dei suoi possibili impatti sull'ecosistema. Attraverso gli UAV è possibile, infatti, misurare, ad un costo decisamente inferiore rispetto i sistemi convenzionali, i livelli di CO₂, di Metano, i profili di temperatura ed umidità, i flussi di radiazioni, l'inquinamento dell'aria e molto altro ancora.
- **Monitoraggio delle specie:** Grazie all'abilità di coprire vaste aree e restare in volo molte ore, gli UAS possono essere utilizzati per individuare e studiare differenti specie animali, dai felini della savana ai mammiferi marini. Ciò permette di tenere sotto controllo alcune delle specie a maggior rischio di estinzione, studiando le loro abitudini, i loro spostamenti e i rischi legati alla loro interazione con l'essere umano.
- **Ricerca Aeronautica:** l'assenza di un pilota a bordo permette di studiare fenomeni legati al volo che altrimenti sarebbero impossibili da studiare a causa dei rischi troppo elevati per il pilota. Risultano, inoltre, particolarmente utili per la raccolta dati di tecnologie sperimentali o in fase di sviluppo, permettendo così un processo di ottimizzazione molto efficace a costi contenuti.
- **Voli Planetari:** gli UAS possono essere operati all'interno delle atmosfere di altri pianeti. Incredibile è il caso di Marte dove il sistema UAV *Ingenuity* è stato in grado di svolgere con successo operazioni di sorvolo della superficie del pianeta rosso [22] scattando foto e registrando video. Il sistema, sviluppato dalla NASA, è stato in grado di compiere fino ad ora 29 operazioni di sorvolo ed, in particolare, la 25esima missione ha stabilito un nuovo record percorrendo oltre 700 metri ad una velocità di 5,5 metri al secondo.
- **GeoIngegneria.**

Missioni Commerciali e Civili

Di seguito si riportano solo le missioni commerciali e civili più diffuse a livello planetario ma, bisogna tenere bene a mente che, in realtà, la lista risulta essere molto più lunga e articolata a causa delle operazioni specializzate per le quali molto spesso vengono progettati e costruiti sistemi UAV ad hoc in grado di svolgerle.

- **Mappatura e Rilevamento Aereo:** il basso costo rende concorrenziale l'utilizzo di UAV per la mappatura di aree scarsamente popolate oppure caratterizzate da condizioni di pericolo per il pilota a bordo. Inoltre, attraverso sensori iperspettrali è possibile, ad esempio, effettuare rilevamenti dei minerali presenti sulla superficie terrestre.
- **Agricoltura:** risulta essere uno degli ambiti di maggior successo nell'utilizzo degli UAS. Attraverso gli UAV è possibile effettuare una serie di operazioni che in passato non era possibile effettuare oppure venivano compiute in maniera poco efficace. Attraverso l'utilizzo di payload "remote-sensing" è possibile monitorare le colture mappandole ed individuando, ad esempio, le zone di terreno con carenza di acqua oppure le piante affette da patologie. Oltre la raccolta e lo studio di dati è possibile anche utilizzare gli UAV in maniera attiva; è possibile, infatti, spruzzare per via aerea i pesticidi, spolverare le colture, seminare, defogliare arbusti alti e molto altro ancora.



Figura 1.18: Rilascio aereo di pesticidi

- **Telecomunicazioni:** in questo caso, attraverso payload di ritrasmissione, gli UAV sono in grado di fornire un ponte di collegamento per quelle regioni difficilmente raggiungibili che non godono della copertura di satelliti per telecomunicazioni.
- **Consegna forniture mediche e aiuti umanitari.**
- **Monitoraggio incendi forestali.**

- **Supporto alla pesca.**
- **Giornalismo.**
- **Ispezione di infrastrutture:** attraverso l'utilizzo di UAS è possibile monitorare in maniera efficace lo stato di conservazione di infrastrutture di importanza strategica quali linee elettriche, gasdotti, ma anche ponti e tralicci. Grazie a foto dettagliate scattate in maniera ravvicinata, è ad esempio possibile analizzare l'integrità strutturale dei pilastri di supporto dei ponti di grandi dimensioni, potendo così intervenire in maniera preventiva con opere di risanamento edilizio, in modo da scongiurare tragedie come quella del Ponte Morandi di Genova. L'esempio di Genova, il quale ha fatto emergere quanto la manutenzione delle infrastrutture risulti critica per la salvaguardia della popolazione, ha messo in luce quanto sistemi UAV dedicati a questi compiti possano svolgere un ruolo chiave nella prevenzione di tali catastrofi, divenendo anzi strumenti fondamentali che dovrebbero essere adottati seduta stante dalle aziende dedite al controllo e alla manutenzione di tali infrastrutture.
- **Riprese cinematografiche, sportive, documentaristiche.**
- **Meteorologia.**
- **Monitoraggio del bestiame.**
- **Sorveglianza:** proprietà private, siti produttivi, siti archeologici e molte altre tipologie di attività possono utilizzare in maniera proficua gli UAS per sorvegliare impianti, confini ed intere zone di interesse.
- **Forze dell'ordine:** negli ultimi anni, sempre più reparti delle forze dell'ordine di tutto il mondo si sono dotate di reparti provvisti di Sistemi UAV. Grazie alla loro versatilità, possono essere utilizzati per inseguire dall'alto i sospettati in fuga, aiutare nelle operazioni di ricerca e soccorso ricoprendo vaste aree in tempi ristretti. Poiché molte di queste attività si svolgono in zone ad elevata densità di popolazione, tali sistemi devono garantire un elevato livello di affidabilità e sicurezza in modo da ridurre al minimo il rischio per le persone coinvolte.
- **Urban Air Mobility:** si tratta di uno dei settori in maggior via di sviluppo in questi anni. Permettere il trasporto di persone all'interno di scenari urbani densamente popolati comporterebbe una rivoluzione nell'ambito dei trasporti, in particolar modo in quelle realtà dove i principali mezzi di trasporto risultano congestionati rendendo difficoltoso il raggiungimento di molte destinazioni. Fare in modo che ciò avvenga in maniera autonoma, senza alcun pilota presente sul velivolo è una sfida estremamente complessa ed avvincente.

Capitolo 2

Analisi RAMS

2.1 Introduzione

L'efficacia di un sistema non dipende esclusivamente dalla performance che esso è in grado di fornire ma, è fortemente influenzata anche da altri fattori. Nel caso degli UAS è necessario misurare l'efficacia operativa di tali sistemi tenendo conto soprattutto della loro **Affidabilità** e della loro **Sicurezza**. Il termine sicurezza racchiude contemporaneamente due differenti concetti, quello di **Safety** e quello di **Security**. La Security riguarda la prevenzione di atti illeciti commessi volontariamente dall'uomo per mezzo del velivolo mentre, con il termine Safety si indica la capacità di mantenere la possibilità di nuocere a cose e/o persone al di sotto di un certo livello ritenuto accettabile. Questo secondo processo è possibile tramite un continuo lavoro di identificazione dei pericoli e di gestione del rischio attraverso il **Safety Risk Management**. Studi di questo genere rientrano all'interno di un panorama molto più complesso, dove vengono analizzati nel dettaglio moltissimi aspetti del nostro sistema e, l'insieme di tutte queste analisi, compone quello che viene definito il campo delle **Analisi RAMS**.

RAMS è l'acronimo per 4 differenti termini che identificano altrettanti ambiti:

- Reliability → **Affidabilità**
- Availability → **Disponibilità**
- Maintainability → **Manutenibilità**
- Safety → **Sicurezza**

Si riporta di seguito una breve trattazione con i fondamenti teorici dei 4 ambiti in questione.

2.2 Reliability

La definizione di Affidabilità di un sistema può essere espressa come:

Capacità del sistema di svolgere il compito per il quale è stato realizzato senza presentare guasti, in un certo intervallo di tempo definito ed all'interno di condizioni operative note.

A livello quantitativo, invece, l'affidabilità può essere espressa in termini di probabilità di accadimento/non accadimento di un evento.

Prima di procedere con una definizione quantitativa dell'affidabilità di un sistema è necessario fare chiarezza sul concetto cardine da cui l'Affidabilità dipende, ovvero la definizione di **guasto**. Il termine italiano "guasto" si riferisce, in inglese, a due definizioni tra loro ben distinte:

- **Failure**: è l'**evento** che ha come risultato l'incapacità da parte del sistema/componente di svolgere in maniera adeguata la propria funzione;
- **Fault**: è lo **stato** in cui si trova il sistema/componente quando è caratterizzato dall'incapacità di funzionare in maniera corretta. In altre parole, una Fault può essere il risultato di una Failure del componente in questione oppure può esistere indipendentemente da una Failure precedente.

Quindi quando si parla di "guasto" bisogna fare attenzione a comprendere se ci si riferisce all'evento che ha portato al malfunzionamento oppure allo stato che lo contraddistingue. Le **cause** che possono portare alla genesi di un guasto sono attribuibili ad una o più delle condizioni seguenti:

- ad una debolezza o errore di progetto;
- ad errori di fabbricazione;
- ad errori durante l'installazione;
- all'utilizzo improprio del sistema;
- a causa della normale usura da utilizzo;
- a causa di errori umani.

Si definisce **guasto primario** quello che non è stato causato, direttamente o indirettamente, da un guasto o un'avaria di un'altra entità. Un **guasto secondario**, invece, è un guasto che scaturisce in maniera diretta o indiretta da un guasto o un'avaria di un'altra entità. Un guasto può anche risultare **improvviso**, ovvero non è prevedibile e non può essere prevenuto attraverso il monitoraggio oppure l'ispezione preventiva. D'altro canto, in molti casi i guasti presentano una

meccanica del guasto molto chiara e riconoscibile, poichè caratterizzata da fenomeni fisici riscontrabili e misurabili prima del verificarsi del guasto. Nei sistemi di nostro interesse i guasti possono avere natura **casuale** come nel caso di componenti elettronici oppure uomo non soggetto ad affaticamento, presentando così tasso di guasto costante nel tempo o, in alternativa, possono avere natura **non casuale** come nel caso di componenti meccanici oppure uomo soggetto ad affaticamento presentando, di conseguenza, tasso di guasto crescente nel tempo. Tenendo conto dell'età del componente, il modello maggiormente diffuso ed utilizzato negli studi in questo ambito è quello della **BATHTUB CURVE**. Questo modello fornisce un andamento del **Tasso di Guasto** (che verrà spiegato a breve) che varia il proprio andamento a seconda del periodo di vita del componente, presentando 3 differenti zone caratterizzate ognuna da un comportamento differente:

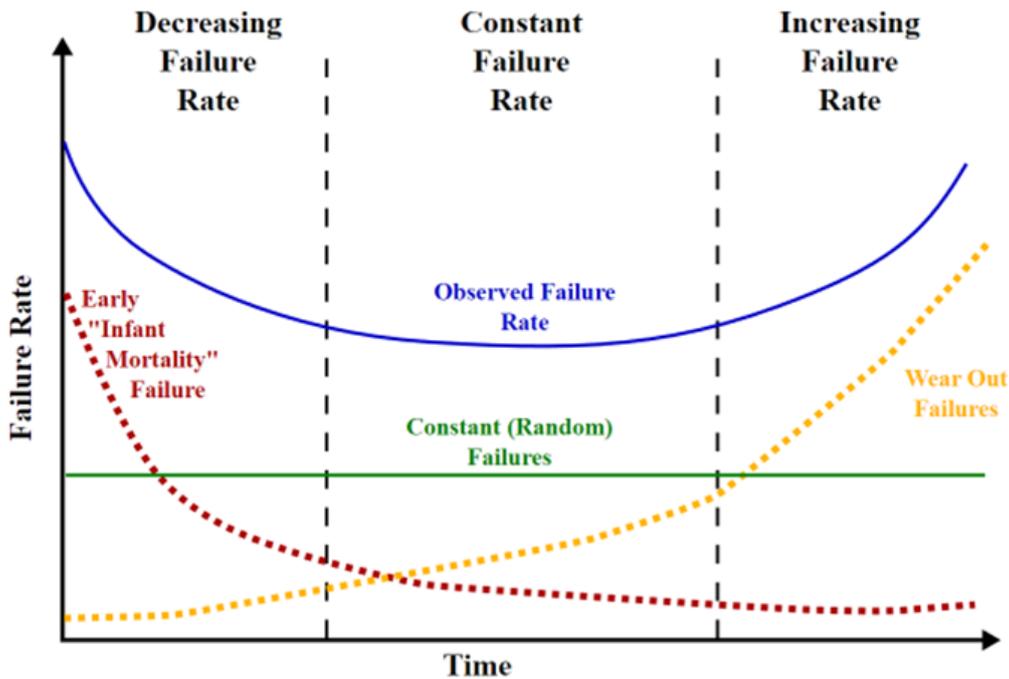


Figura 2.1: Andamento del Modello "Bathtub"

- **Guasti durante il Rodaggio:** la parte iniziale del grafico, noto anche come *periodo della mortalità infantile*, è caratterizzato dal verificarsi di failure dovute ad errori di progetto o di fabbricazione o di installazione. Il Tasso di Guasto risulta essere **decrescente**, poichè all'aumentare della vita accumulata dal componente, la probabilità che queste tipologie di failure si verifichino diminuisce rapidamente all'inizio andandosi poi ad appiattare;

- **Guasti Casuali:** la zona centrale della curva rappresenta il periodo di piena operatività del componente in cui le failure sono nella maggior parte dei casi dovute a cause aleatorie o accidentali, come ad esempio nel caso di applicazioni involontarie di carichi oltre il limite sopportabile dal componente. In questo caso il tasso di guasto risulta essere leggermente crescente, ma la pendenza è talmente tanto ridotta da poter essere considerato **costante**. Quando vengono effettuate delle stime riguardo la vita media del componente progettato, si è soliti verificare che tale valore rientri all'interno di questa zona, garantendo così una certa affidabilità durante il suo utilizzo per un determinato periodo di tempo;
- **Guasti per Invecchiamento:** la zona finale presenta un tasso di guasto **crescente**. Le failure che si verificano sono dovute all'eccessiva usura accumulata da parte del componente, o più semplicemente a causa del raggiungimento del termine della sua vita effettiva.

Per i componenti utilizzati all'interno del nostro sistema vorremmo dunque avere una zona dei guasti casuali il più ampia possibile, così da poter ottenere un sistema più affidabile a lungo periodo e che richiede una strategia di manutenzione meno stringente. Generalmente, infatti, il componente dovrebbe essere sostituito prima dell'ingresso nella fase dei guasti per invecchiamento.

Per comprendere in maniera adeguata quanto detto fino ad ora è necessario ora definire attraverso un approccio matematico cosa sia il tasso di guasto e quantificare l'affidabilità.

Si definisce "**Tasso di Guasto**", in inglese "**Failure Rate**", la **probabilità istantanea di guasto del componente, ossia la probabilità di avere un guasto in un certo istante**. Può essere quindi definita come il numero di guasti diviso per il numero di componenti operativi per l'unità di tempo.

$$T.G. = \frac{\text{n}^\circ \text{ di guasti}}{\text{n}^\circ \text{ componenti operativi} \cdot \text{unità di tempo}} \quad (2.1)$$

Analiticamente, il Failure Rate è la misura istantanea della variazione della curva della funzione cumulativa rispetto alla probabilità che il componente sia ancora sopravvissuto.

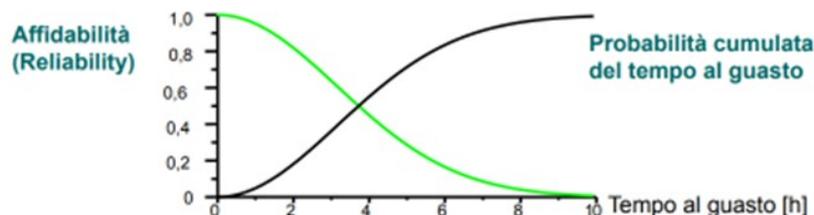


Figura 2.2: Andamenti caratteristici

La **curva cumulativa F(t)** rappresenta l'integrale nel tempo della **funzione densità di probabilità di guasto f(t)** che può essere rappresentata, ad esempio, da una distribuzione Gaussiana normale. Si fa affidamento alla distribuzione Gaussiana Normale poichè risulta essere quella che meglio descrivere i fenomeni aleatori, caratterizzati da molti parametri e risulta essere un'ottima approssimazione nel caso di **guasti per vecchiaia o usura** (quindi molto utile per analizzare i fenomeni nella zona ifnale della bathtub). Infine, è possibile definire l'**Affidabilità** come **il complemento ad 1 della funzione di probabilità di guasto**.

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{\sigma^2(2\pi)}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2.2)$$

$$F(t) = \int f(t)dt \quad (2.3)$$

$$R(t) = 1 - \int f(t)dt \quad (2.4)$$

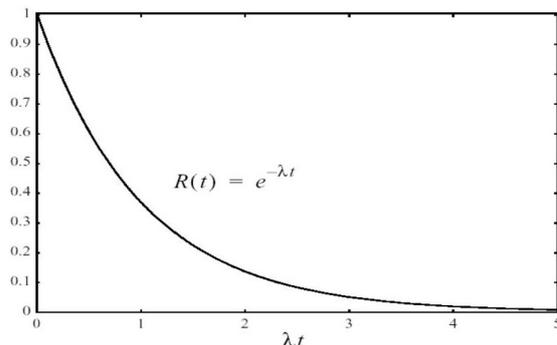
Per quanto detto in merito al tasso di guasto dunque:

$$T.G. = \frac{\frac{\delta F(t)}{\delta t}}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.5)$$

$$T.G. = -\frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dt} \quad (2.6)$$

Emerge che il Tasso di Guasto è inversamente proporzionale all'affidabilità del sistema, questo implica che con il passare del tempo il Tasso di Guasto aumenta mentre l'Affidabilità del sistema diminuisce.

Un caso estremamente importante è anche quello che riguarda i **guasti casuali** dovuti a condizioni accidentali non dipendenti dall'età. La distribuzione che meglio approssima questa situazione, ovvero tutti quei guasti che NON dipendono da usura o vecchiaia, è una distribuzione esponenziale decrescente:



$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

$$F(t) = \int f(t)dt \quad (2.8)$$

$$R(t) = 1 - \int f(t)dt = e^{-\lambda t} \quad (2.9)$$

$$T.G. = -\frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dt} = \lambda = \text{cost} \quad (2.10)$$

Per i guasti casuali, il tasso di guasto è costante e pari a λ !

C'è quindi una sostanziale differenza nel trattare i guasti per usura ed i guasti casuali: per i primi il T.G. è crescente, mentre per i secondi è costante.

In ambito aerospaziale, preso il singolo componente, l'affidabilità è solitamente espressa all'interno del datasheet attraverso il valore del tasso di guasto. Se, invece, si ha a che fare con **Sistemi Complessi** composti da più componenti, è molto improbabile che sia presente il tasso di guasto dei singoli componenti. Al loro posto, il parametro più utilizzato per esprimere l'affidabilità del sistema è il **MEAN TIME BETWEEN FAILURE "MTBF"**, espresso come sommatoria dei singoli componenti. L'espressione che descrive il MTBF è:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.11)$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (2.12)$$

$$R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}} \quad (2.13)$$

Le espressioni appena riportate ovviamente risultano valide solo nel caso di guasti casuali vista l'espressione esponenziale dell'affidabilità. Nel caso in cui invece si volesse considerare il caso dei guasti da usura l'espressione si complica molto dovendo considerare l'integrale dell'espressione della gaussiana normale.

Un componente affidabile presenta un T.G. Basso o in alternativa un MTBF Alto.

Il modello di affidabilità più diffuso per calcolare l'affidabilità di sistemi complessi è il **Reliability Block Diagram**. Si tratta di una rappresentazione a blocchi in cui i componenti sono collegati tra loro dal punto di vista dell'affidabilità, quindi i collegamenti presenti non rappresentano né un collegamento fisico né un collegamento funzionale. Le due strutture maggiormente diffuse all'interno di questo modello sono la **struttura Serie** e la **struttura Parallelo**.

Nel caso di componenti in serie, l'affidabilità si calcola come:

$$R = \prod_{i=1}^N R_i \quad (2.14)$$

Nel caso invece di componenti in parallelo:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - R_i) \quad (2.15)$$

Generalmente, l'affidabilità di un sistema serie è minore dell'affidabilità di ogni singolo componente, mentre per un sistema parallelo è maggiore.

Nel caso, infine, di strutture complesse dove coesistono componenti in serie ed in parallelo, bisogna fare in modo di riportarsi ad una singola struttura semplice in serie o in parallelo attraverso alcune tecniche come, ad esempio, il **Modello Bayes**, il **Modello Binomiale**, il **Modello Stand-By** o il **Modello Multifase**.

L'ultimo tassello necessario a completare la panoramica generale sull'affidabilità dei sistemi consiste nel valutare quale sia la **severità** di un guasto e la conseguente criticità per il sistema tenendo conto della probabilità con cui tale guasto occorre. La severità di un guasto può essere classificata in virtù delle conseguenze che può avere all'interno del contesto considerato. Questo implica che lo stesso guasto, in due contesti differenti, potrà presentare due livelli di severità diversi. Lo standard maggiormente diffuso ed utilizzato è il **MIL-STD-882D** (e successivo MIL-STD-882E). Al suo interno è presente una suddivisione in **4 classi di severità** che è possibile ritrovare identicamente all'interno della ECSS-Q-ST-30C:

SEVERITY CATEGORIES		
Description	Severity Category	Mishap Result Criteria
Catastrophic	1	Could result in one or more of the following: death, permanent total disability, irreversible significant environmental impact, or monetary loss equal to or exceeding \$10M.
Critical	2	Could result in one or more of the following: permanent partial disability, injuries or occupational illness that may result in hospitalization of at least three personnel, reversible significant environmental impact, or monetary loss equal to or exceeding \$1M but less than \$10M.
Marginal	3	Could result in one or more of the following: injury or occupational illness resulting in one or more lost work day(s), reversible moderate environmental impact, or monetary loss equal to or exceeding \$100K but less than \$1M.
Negligible	4	Could result in one or more of the following: injury or occupational illness not resulting in a lost work day, minimal environmental impact, or monetary loss less than \$100K.

Figura 2.3: Tabella livelli di Severità secondo la MIL-STD-882E

Per quanto riguarda, invece, la frequenza di accadimento del guasto, sono possibili **5 classi di occorrenza**, suddivise come in tabella:

PROBABILITY LEVELS			
Description	Level	Specific Individual Item	Fleet or Inventory
Frequent	A	Likely to occur often in the life of an item.	Continuously experienced.
Probable	B	Will occur several times in the life of an item.	Will occur frequently.
Occasional	C	Likely to occur sometime in the life of an item.	Will occur several times.
Remote	D	Unlikely, but possible to occur in the life of an item.	Unlikely, but can reasonably be expected to occur.
Improbable	E	So unlikely, it can be assumed occurrence may not be experienced in the life of an item.	Unlikely to occur, but possible.
Eliminated	F	Incapable of occurrence. This level is used when potential hazards are identified and later eliminated.	Incapable of occurrence. This level is used when potential hazards are identified and later eliminated.

Figura 2.4: Tabella livelli di Occorrenza secondo la MIL-STD-882E

Non si tiene effettivamente conto della classe "Eliminated" poichè viene utilizzata solo nel caso di potenziali pericoli che vengono identificati ed eliminati.

Unendo la severità e la probabilità di accadimento del guasto si ottiene un valore identificativo della **Criticità del guasto**. Tanto più il valore risulta essere elevato e tanto più sarà necessario intervenire in maniera tempestiva.

$$CN = SN \cdot PN \quad (2.16)$$

SEVERITY PROBABILITY	Catastrophic (1)	Critical (2)	Marginal (3)	Negligible (4)
Frequent (A)	High	High	Serious	Medium
Probable (B)	High	High	Serious	Medium
Occasional (C)	High	Serious	Medium	Low
Remote (D)	Serious	Medium	Medium	Low
Improbable (E)	Medium	Medium	Medium	Low
Eliminated (F)	Eliminated			

Figura 2.5: Matrice di Criticità secondo la MIL-STD-882E

Un guasto frequente (5) e catastrofico (4), ha un'altissima criticità (20).

Un guasto frequente (5) e trascurabile (1), ha una criticità superiore ($5 > 4$) rispetto ad un guasto improbabile (1) e critico (4).

Definire in maniera corretta la Criticità di un sistema è fondamentale per ottenere una corretta diagnosi dei guasti ed un programma di manutenzione efficace. Le tecniche utilizzate per definire un corretto **Risk Assessment** sono le stesse che vengono utilizzate nell'ambito della Safety e tra le più diffuse ci sono la **FMEA/FMECA** e la **FTA** che verranno analizzate nel dettaglio in seguito. Aumentare l'affidabilità è un requisito fondamentale durante la fase di progettazione dei sistemi e negli anni sono state sviluppate alcune filosofie che hanno riscosso molto successo:

- **Semplicità:** più un sistema è semplice e più risulta affidabile;
- **Fault Avoidance:** l'idea base è di evitare che si verifichino i guasti a prescindere, per questo motivo è molto diffuso in ambito spaziale e richiede componenti di altissima qualità;
- **Fault Tolerance:** si applica il concetto della **ridondanza** affinché il sistema risulti in grado di tollerare il verificarsi di un guasto.

2.3 Availability

La definizione di Disponibilità di un sistema può essere espressa come:

Abilità di un sistema di essere in uno stato tale per cui sta funzionando, ossia può svolgere la funzione per la quale è stato progettato o è pronto ad eseguire tale funzione sempre all'interno di un certo intervallo di tempo definito e di certe condizioni operative note.

Si tratta di una capacità **intrinseca** del sistema dettata dalle scelte progettuali combinate con l'affidabilità del sistema, la sua manutenibilità ed il supporto alla manutenzione. La Disponibilità rappresenta di conseguenza un fattore influente che incide sul costo del ciclo di vita del sistema, poichè riguarda in maniera stringente la fase di vita operativa del prodotto.

In termini probabilistici, la Disponibilità può essere vista come la probabilità che il sistema sia operativo o pronto ad entrare in funzione quando gli viene richiesto. Può essere dunque espressa come il **rapporto fra il tempo di corretto funzionamento del componente ed il tempo di funzionamento totale richiesto al componente RIPARABILE**. Si è posta l'attenzione sull'aggettivo "riparabile" poichè sono proprio gli interventi di manutenzione per riportare il sistema al suo stato di funzionamento ordinario che impattano sulla disponibilità riducendone il valore. Quando si procede a riparare un sistema sono possibili due differenti approcci:

- **As bad as old**: si riporta il componente ad avere le stesse prestazioni che aveva prima dell'intervento di manutenzione (tasso di guasto continua a crescere linearmente);
- **As good as new**: il componente viene riportato alle sue prestazioni iniziali attraverso un intervento di tipo rigenerativo.

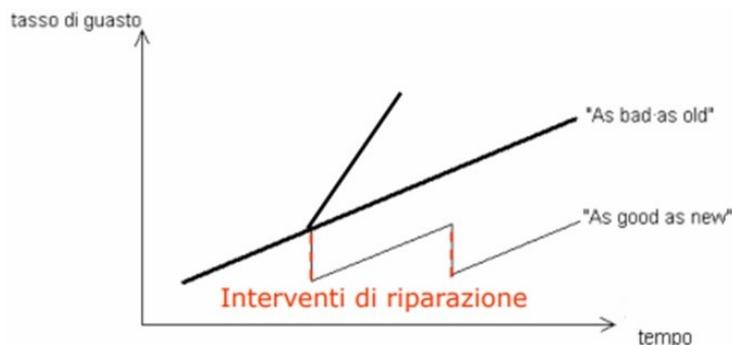


Figura 2.6: Andamento Tasso di Guasto a seconda dell'approccio

Per ottenere una sua prima generica espressione, è prima di tutto necessario introdurre la grandezza **MTTR**.

Il "**MEAN TIME TO REPAIR**" rappresenta il tempo medio necessario per eseguire un intervento di manutenzione *correttiva*, risulta quindi essere il parametro base per indicare la manutenibilità del sistema.

L'obiettivo è quello di ottenere un valore il più basso possibile, poichè vorrebbe dire ottenere una Disponibilità del sistema elevata.

Esso può essere espresso come il rapporto:

$$MTTR = M_{ct} = \frac{\text{Tempo totale di Manutenzione}}{\text{Numero di interventi effettuati}} \quad (2.17)$$

Trattandosi di interventi correttivi, all'interno del MTTR non sono considerati i tempi logistici ed amministrativi, come, ad esempio, i tempi di approvvigionamento dei componenti.

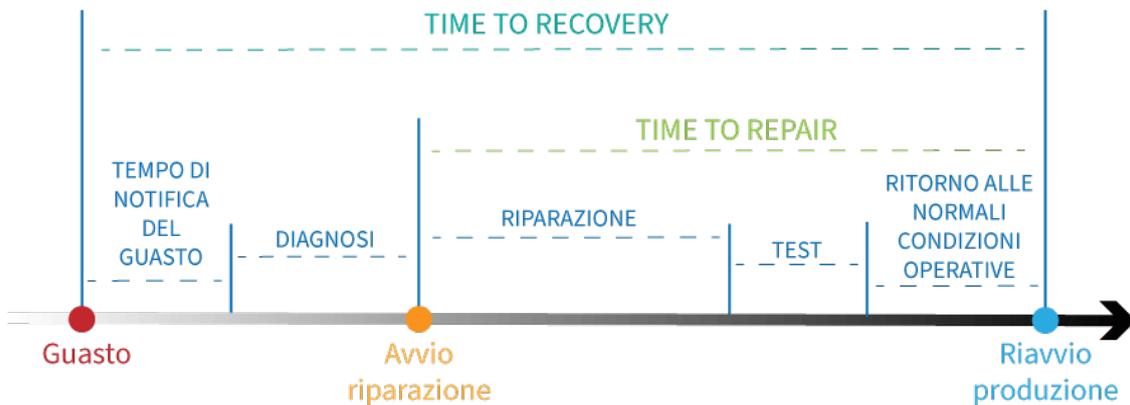


Figura 2.7: Rappresentazione temporale del MTTR

Definito il MTTR è possibile fornire l'espressione della Disponibilità intrinseca del sistema:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.18)$$

Nel caso in cui i tassi di guasto e di riparazione dovessero risultare costanti, l'espressione si trasformerebbe in:

$$A = \frac{1/\lambda}{(1/\lambda) + (1/\mu)} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (2.19)$$

L'espressione della Disponibilità intrinseca, però, risulta essere fortemente legata al puro concetto teorico, infatti, difficilmente viene utilizzata in campo applicativo. Volendo fare chiarezza, è dunque possibile definire 3 differenti fattori per indicare la Disponibilità a seconda delle condizioni che si stanno analizzando:

- **Inherent Availability:** La Disponibilità Inerente/Intrinseca è quella basica che è stata appena introdotta. Rappresenta la probabilità che il sistema, quando opera in condizioni definite e in un ambiente di supporto ideale, funzioni in modo soddisfacente in qualsiasi momento come richiesto. Come spiegato in precedenza, ciò non include la manutenzione preventiva o programmata, i ritardi logistici e altri fattori amministrativi. L'espressione risulta essere:

$$A_I = \frac{MTBF}{MTBF + M_{ct}} \quad (2.20)$$

Quanto più il M_{ct} risulta essere basso, e tanto più la disponibilità sarà prossima al valore unitario.

- **Achieved Availability:** La Disponibilità Raggiunta rappresenta un caso più vicino alla realtà in cui, il sistema, non si ferma esclusivamente per operazioni di manutenzione correttiva ma, tiene conto anche degli interventi di manutenzione **preventiva**. Tali interventi hanno il compito di prevenire l'insorgenza di futuri possibili guasti. La sua espressione è :

$$A_A = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}} \quad (2.21)$$

Il "**Mean Time Between Maintenance**" è un altro parametro di misura della manutenibilità del sistema che tiene conto sia delle azioni correttive sia di quelle preventive. Il termine \bar{M} , invece, rappresenta il tempo medio di manutenzione attiva, ovvero, il tempo medio necessario ad effettuare un'operazione di manutenzione qualunque.

- **Operational Availability:** La Disponibilità Operativa, infine, risulta essere il parametro di maggior interesse per il cliente. Esso descrive la probabilità che il sistema all'interno di un ambiente operativo e condizioni definite sia in grado di operare in modo soddisfacente quando richiesto. La sua espressione è:

$$A_O = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad (2.22)$$

L'MDT, o "**Maintenance Down Time**" è il fattore più generico possibile che tiene conto del tempo medio di manutenzione \bar{M} e dei ritardi di natura logistica ed amministrativa dovuti ad un sistema di supporto imperfetto e quindi reale.

In campo prettamente Aeronautico, un'ultima espressione alternativa per la Disponibilità può essere:

$$A = \frac{FH}{FH_{Sched}} \quad (2.23)$$

dove FH rappresenta le ore di volo compiute mentre FH_{Sched} sono le ore di volo schedate.

2.4 Maintainability

La definizione di Manutenibilità di un sistema può essere espressa come:

Attitudine di un sistema in assegnate condizioni operative ad essere sottoposto a manutenzione ed essere riportato in una stato nel quale può svolgere la funzione richiesta.

In termini probabilistici, quindi, può essere espressa come la probabilità che un'azione di manutenzione sul sistema possa essere effettuata in un definito intervallo di tempo, usando procedure ed attrezzature prescritte. Anche la Manutenibilità risulta essere una proprietà **intrinseca** del sistema derivante da molteplici fattori, primo fra tutti le scelte di design compiute durante la fase progettuale. L'obiettivo è quello di riuscire ad effettuare una manutenzione del sistema in modo efficace ed efficiente senza andare ad impattare in maniera troppo rilevante sulla disponibilità del prodotto. Come già anticipato in precedenza, l'unità di misura maggiormente diffusa per quantificare la Manutenibilità di un sistema è il MTTR:

$$MTTR = \frac{\text{Tempo totale delle riparazioni}}{\text{Numero totale di riparazioni}} \quad (2.24)$$

Se si considera il notevole impatto che la Manutenibilità ha nei confronti dei costi complessivi del ciclo vita del sistema, essa può anche essere definita come la probabilità che i costi di manutenzione non siano superiori ad una cifra definita per un determinato periodo di tempo. Per questo motivo, negli anni, sono nate differenti espressioni alternative della Manutenibilità e le principali risultano essere:

- **Mean Time Between Maintenance:** Il "MTBM" è la media statistica dei tempi di disponibilità nelle condizioni stabilite tra due successivi interventi di manutenzione. Esso tiene conto sia degli interventi di natura preventiva sia di quelli di natura correttiva;
- **Mean Time Between Replacement:** Il "MTBR" è un parametro specifico che viene utilizzato nel caso in cui l'operazione di manutenzione consista nella **sostituzione** di uno o più componenti. Risulta particolarmente utile nel caso di operazioni di natura correttiva che avvengono spesso durante il ciclo vita di un sistema (ad esempio la sostituzione di uno pneumatico per un'auto);
- **Maintenance Down Time:** Come accennato in precedenza è il parametro di misura della Manutenibilità più generico possibile poichè tiene conto dei tempi operativi della manutenzione ma anche dei ritardi logistici ed amministrativi dovuti ad un supporto imperfetto e reale;

- **Maintenance Man-Hours per Flight Hour:** Il "MMH/FH" è un parametro molto diffuso soprattutto in campo aeronautico ed esprime il numero di ore di lavoro manutentivo necessarie a garantire un ora di volo. Il vantaggio di questo parametro è che può essere espresso non solo in termini di ore lavoro ma anche in termini di costi legati a quelle ore lavoro;
- **Maintenance Cost per System Operating Hour:** Il "COST/OH" non è altro che la versione alternativa del parametro precedente che considera i costi coinvolti.

Volendo contestualizzare il discorso nel mondo degli UAS, basti pensare che UAS di piccole dimensioni solitamente presentano un MMH/FH inferiore o pari ad 1, ovvero, per ogni ora di volo è necessaria all'incirca un'ora di lavori di manutenzione. Sistemi molto più complessi, invece, come nel caso degli HALE, presentano valori paragonabili a quelli dei velivoli convenzionali con pilota. Un esempio è il Pioneer RQ-2 che presenta un MMH/FH di 5.87. Per ogni ora di volo tale sistema richiede all'incirca 6 ore di manutenzione, in linea con molti velivoli convenzionali che solitamente presentano un valore compreso tra 1 e 17. Di seguito è riportato uno schema esplicativo di quale sia la suddivisione delle tempistiche che caratterizzano le fasi in cui il sistema è operativo/in grado di operare ed in cui il sistema è fermo.

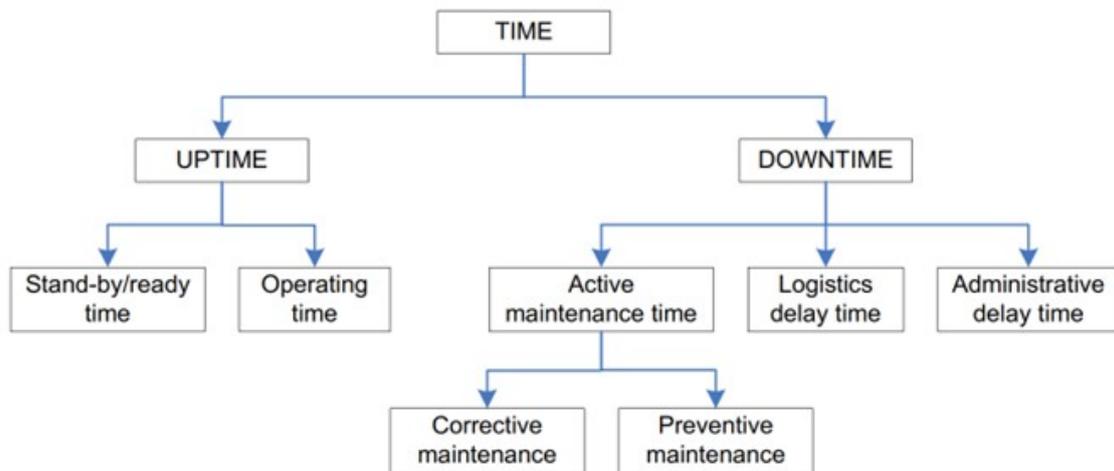


Figura 2.8: Suddivisione delle tempistiche

Con il rapido progredire delle tecnologie e l'aumento dei costi, dagli anni '80 in poi, minimizzare il MMH/FH è divenuta una prerogativa in tutti gli ambiti di sviluppo, da quello edile a quello aeronautico. Le comunità competenti hanno compreso che, un valore elevato, nella maggior parte dei casi, vorrebbe dire ottenere dei costi di manutenzione elevati a tal punto da risultare insostenibili, portando così al fallimento del progetto.

Secondo quanto detto fino ad ora, è possibile 3 differenti tipologie di manutenzione:

- **Manutenzione Correttiva:** Riguarda le operazioni **non programmate** necessarie a seguito del verificarsi di un guasto improvviso che richiede una riparazione/sostituzione immediata;
- **Manutenzione Preventiva:** Racchiude tutte quelle operazioni **programmate** in anticipo con lo scopo di evitare che il guasto si manifesti, garantendo così l'operatività del sistema;
- **Manutenzione Predittiva:** Certamente rappresenta l'approccio più innovativo tra i tre. Detta anche "*on condition*", si occupa di monitorare il sistema andando ad intervenire solamente quando il sistema inizia a mostrare alcuni fenomeni caratteristici che precedono il guasto. Per ottemperare a questo scopo, è necessario includere dei sensori dedicati al compito di monitoraggio fin dalla fase iniziale di design.

Una differente classificazione degli interventi può essere ottenuta a seconda di chi svolge l'operazione e del luogo in cui viene svolta. Nello specifico, si potranno avere 4 differenti livelli:

- **Operazioni di 1° Livello:** si tratta di operazioni a **livello di organizzazione**, ovvero, operazioni che possono essere eseguite nel sito in cui deve svolgersi la missione. Un classico esempio è il rifornimento di carburante, oppure la sostituzione delle batterie per un piccolo UAS;
- **Operazioni di 2° Livello:** queste operazioni a **livello intermedio** possono ancora essere svolte nel sito della missione ma, necessitano di un luogo apposito poichè le operazioni non possono essere svolte all'aperto. In campo aeronautico, tutti gli aeroporti presentano un hangar in grado di accogliere questa tipologia di operazioni essendo attrezzati con apparecchiature adatte allo scopo;
- **Operazioni di 3° Livello** lo step successivo coinvolge le operazioni a **livello di deposito**. Riguarda interventi complessi che molto spesso richiedono attrezzature specifiche e tengono il velivolo fermo a terra per molto tempo. A causa della complessità delle operazioni in molti casi risulta necessario dover trasferire il velivolo lontano dal sito in cui deve svolgersi la missione;
- **Operazioni di 4° Livello:** ultimo livello, richiede l'intervento a **livello di produttore**. Il velivolo viene trasferito all'interno di impianti industriali appositi in cui la manutenzione è operata direttamente dal costruttore del velivolo e vengono effettuate solo dopo un certo numero di anni.

Per quanto riguarda gli UAS di grandi dimensioni l'approccio è lo stesso dei velivoli con equipaggio a bordo. Nel caso di piccoli sistemi UAS, invece, i due livelli intermedi vengono eliminati, lasciando spazio solo a due differenti modalità di intervento: gli interventi sul campo, di piccola entità e gli interventi complessi in azienda. Questo approccio permette risparmi economici considerevoli dal punto di vista delle facilities di cui è necessario disporre sul sito della missione. Piccole riparazioni strutturali dovrebbero essere possibili sul campo. Piccole strutture in materiale composito possono incrinarsi, delaminarsi, scheggiarsi o creparsi. Questi danni possono essere riparati con strumenti e materiali forniti in un kit di riparazione da campo. Questo kit può includere tessuto composito, cesoie, resina epossidica, carta vetrata e guanti. Interventi di questo tipo potrebbero garantire il prosieguo della missione. Un po' di addestramento sarebbe raccomandato, ma in molti casi anche improvvisare potrebbe essere sufficiente per concludere la missione.

Di seguito è riportata la tipica suddivisione di una generica operazione di manutenzione:

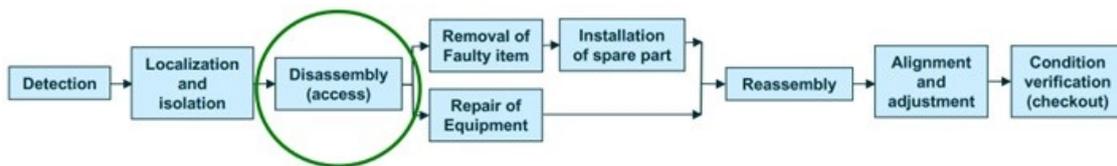


Figura 2.9: Suddivisione del processo di manutenzione

Osservando il grafico, una delle fasi che risulta essere determinante per la Manutenibilità del sistema è il *Disassemblaggio*, o meglio l'**Accessibilità** al componente guasto. Una volta compreso quale sia il guasto, infatti, deve essere possibile poter raggiungere con facilità il componente interessato in modo da ripararlo o sostituirlo. Si sviluppa un livello molto più alto di Manutenibilità quando gli elementi del sistema con un elevato tasso di guasto sono prontamente accessibili. Questo spinge i progettisti a riflettere attentamente sulla predisposizione dei pannelli per l'accesso all'area in cui si trovano i componenti ed anche sul posizionamento dei componenti stessi, affinché l'intervento su un componente non richieda di doverne disassemblare altri.

La tecnica più utilizzata per definire un corretto piano di manutenzione è la **Reliability Centered Maintenance "RCM"**, in italiano conosciuta anche come *Manutenzione Incentrata sull'Affidabilità*. Si tratta di un processo di perfezionamento continuo delle strategie di manutenzione con l'obiettivo di individuare la strategia più conveniente per massimizzare l'affidabilità dei sistemi, minimizzando i costi di gestione. Volendo massimizzare l'Affidabilità, questa tecnica richiede molti dati provenienti da analisi preliminari di tipo FMEA o FTA, permettendo così di identificare i componenti con maggior criticità.

2.5 Safety

La definizione di Sicurezza di un sistema può essere espressa come:

Capacità di un sistema di presentare un livello di rischio inferiore ad una certa soglia ritenuta accettabile o che le normative vigenti ritengono accettabile.

Rispetto ai casi precedenti emerge una prima grossa differenza, difatti, la sicurezza, risulta essere, nella maggior parte dei casi, una caratteristica imposta in maniera stringente dalle normative vigenti. In campo aeronautico, se il requisito di sicurezza non viene soddisfatto, allora non è possibile ottenere la certificazione del prodotto. La Safety risulta essere talmente tanto importante da essere considerata e studiata separatamente in maniera più approfondita. Vale la pena, inoltre, fornire anche una definizione accurata del concetto di **Rischio**:

Il Rischio può essere definito come una situazione tipicamente indesiderata che possiede una certa potenzialità di accadere con potenziali conseguenze negative sul sistema e ciò che lo circonda.

Una cosa molto importante da chiarire fin da subito è che **il rischio è qualcosa di intrinseco a qualunque sistema ed è impossibile da eliminare completamente**. L'obiettivo è quindi quello di valutare il rischio con metodologie apposite e cercare delle soluzioni volte a minimizzarlo il più possibile.

Il livello di rischio, in linea di massima, può essere minimizzato:

- riducendo la gravità delle potenziali conseguenze;
- riducendo la probabilità del suo verificarsi;
- riducendo l'esposizione del sistema al rischio.

Il riferimento è la Norma **UNI EN ISO 12100:2010**. Tale norma fornisce sia la terminologia standardizzata che una metodologia di riferimento per l'analisi dei rischi. Nata per la sicurezza dei macchinari, la sua generalità ne estende la validità ai sistemi complessi. La norma presenta una metodologia generale per:

- l'identificazione dei pericoli (Hazard Identification);
- la stima dei rischi associati a tali pericoli (Risk Estimation);
- la **valutazione dei rischi** (Risk Assessment o Risk Evaluation);
- le eventuali azioni da intraprendere per eliminare o ridurre i rischi.

Il Rischio associato al verificarsi di un evento negativo, viene espresso in funzione della probabilità (P) che tale evento effettivamente si verifichi ed in funzione della gravità (G) delle conseguenze legate al suo accadimento. In formule:

$$R = P \cdot G \quad (2.25)$$

Andando a diagrammare tale espressione in funzione dei due parametri, si ottengono delle curve a pari livello di Rischio rappresentate da iperboli equilateri:

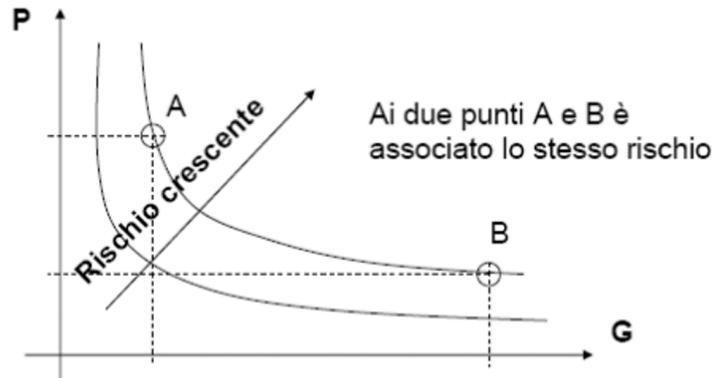


Figura 2.10: Esempio curve di rischio

Le classi in cui possono essere suddivise la probabilità di accadimento e la gravità delle conseguenze sono analoghe a quanto visto nella sezione inerente l’Affidabilità (quando si è giunti a definire la matrice di criticità). A seconda delle applicazioni, le classi possono variare leggermente, come nel caso riportato di seguito, dove le classi di probabilità risultano essere solamente 4 anziché 5 ma, il concetto di base rimane lo stesso, si utilizza soltanto una metrica differente. Nel caso della Sicurezza, quella che si ottiene viene detta **Matrice di Rischio**:

MATRICE DI RISCHIO				
R = P x G	GRAVITÀ conseguenze			
PROBABILITÀ frequenza	Catastrofica	Critica	Minore	Irrilevante
Elevata	4	4	4	3
Medio alta	4	4	3	1
Occasionale	4	3	2	1
Remota	3	2	2	1
Legenda:				
1. Accettabile				
2. Migliorabile				
3. Rivedibile				
4. Non accettabile				

Figura 2.11: Esempio Matrice di Rischio

Nelle zone in cui il rischio è ritenuto "accettabile" o "migliorabile", è necessario intervenire con azioni *migliorative* da programmare nel medio e lungo termine. Nelle zone in cui il rischio è ritenuto "rivedibile", è necessario intervenire con azioni *correttive* da programmare con una certa urgenza. Nelle zone in cui il rischio è ritenuto "Non accettabile", infine, è necessario intervenire con azioni correttive *immediate*, in nessun modo dilazionabili e per nessun motivo rinviabili. Gli approcci metodologici che è possibile utilizzare per effettuare una corretta analisi e valutazione del rischio, possono essere suddivisi in due famiglie:

- **Approcci Deduttivi/Reattivi:** Partendo da un evento incidentale potenzialmente pericoloso risalgono (... "backward approach") alle cause tecniche primarie che li hanno determinati definendoli "*eventi base*";
- **Approcci Induttivi/Preventivi:** Partendo dalla frammentazione del sistema nei suoi sottosistemi e componenti, procedono (... "forward approach") ad identificare tutti i possibili modi di guasto dei singoli componenti andando ad analizzare le ripercussioni a livello di sistema e l'eventuale mal funzionamento che ne scaturisce.

La fase di sviluppo concettuale qualitativo dei due approcci può essere anche integrata da una fase di studio quantitativo tesa a definire le probabilità di accadimento dei differenti eventi che portano ai possibili stati finali del sistema.

Metodologie di carattere generale che permettono di avere semplicemente una visione approssimativa della situazione sono quelle che coinvolgono l'esperienza storica, lo studio di banche dati, l'utilizzo di check list o metodi indicizzati. Per ottenere, però, risultati convincenti è necessario spingersi oltre. La metodologia deduttiva più utilizzata al giorno d'oggi è la **Fault Tree Analysis "FTA"**.

Le principali metodologie induttive, invece risultano essere:

- **Hazard and Operability Study (HAZOP);**
- **Preliminary Hazard Analysis (PHA);**
- **Failure Mode and Effects Analysis /FMEA);**
- **Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA);**
- **Event Tree Analysis (ETA).**

Nelle pagine seguenti verranno analizzate nel dettaglio alcune di queste metodologie, facendo emergere punti di forza e debolezze che rendono questi metodi applicabili agli studi di Sicurezza ed Affidabilità dei sistemi.

2.5.1 Fault Tree Analysis (FTA)

L'**Albero dei Guasti** è una tecnica **deduttiva** largamente utilizzata per studiare la Sicurezza e l'Affidabilità di missione. Si affianca ad altre tecniche come la FMECA andando così a comporre uno scenario complesso ed articolato di analisi volte a dimostrare il pieno rispetto delle normative. Si tratta di un'analisi di tipo **top-down** perché parte da un evento indesiderato e valuta le cause che possono averlo determinato in un processo che arriva a coinvolgere i singoli componenti. Gli obiettivi che è possibile raggiungere attraverso questa tecnica sono quelli di:

- identificare quali sono le **cause** alla base di un certo evento indesiderato che ha un certo impatto sulla Sicurezza;
- valutare gli **errori umani** nelle decisioni e nelle azioni compiute;
- far emergere le **interazioni di guasto**, ovvero quella serie di eventi che hanno permesso il manifestarsi del guasto;
- ottenere un'analisi qualitativa dell'evento ma, se richiesto, è possibile anche ottenere un'analisi quantitativa specialmente per fini di certificazione;
- definire la **probabilità di accadimento del guasto** (PN), fornendo così un'indicazione precisa.

La metodologia FTA è descritta in diversi standard industriali e governativi nel mondo. Per quanto riguarda il settore Aerospaziale, gli standard attualmente in vigore sono il **SAE ARP4761** per l'aerospazio civile, il **MIL-HDBK-338** per i sistemi militari, la norma **IEC 61025** destinata all'uso intersettoriale. Secondo questi standard, la tecnica si sviluppa attraverso un modello **grafico/logico** basato sui simboli della **logica booleana**, in particolar modo le porte logiche **AND** e **OR**. Tali porte permettono di scomporre un evento in una serie di eventi a livello inferiore che dovranno verificarsi tutti nel caso della porta AND, oppure basta che se ne verifichi uno solo nel caso della porta OR.

L'evento iniziale da cui l'albero si sviluppa prende il nome di **TOP EVENT**. Esso rappresenta situazioni di pericolo che sono generalmente identificabili mediante tecniche più grossolane di valutazione dei rischi come la "*What if Analysis*" o la "*HAZOP Analysis*". Attraverso una scomposizione sempre più profonda degli eventi, la FTA è in grado di definire quali siano le cause **basilari** di ogni evento di guasto, generando in questo modo una lista, detta "**Cut Set**" delle combinazioni dei malfunzionamenti che possono determinare l'evento principale. Andando ad eliminare le cause che si ripresentano più di una volta, si è in grado di definire la "**Minimal Cut Set**" (MCS), ovvero la più piccola combinazione possibile di malfunzionamenti che, accadendo contemporaneamente, determinano l'evento principale. Un generico esempio di albero dei guasti è il seguente:

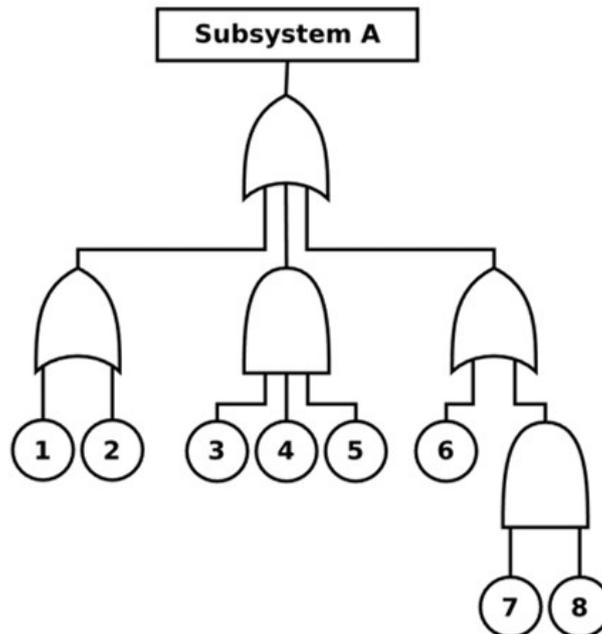


Figura 2.12: Esempio Albero dei Guasti

Affinché i risultati di questa analisi risultino attendibili, è necessario tenere a mente che bisogna rispettare un'importante ipotesi di base: *i componenti posso assumere soltanto due stati; (1) funzionamento regolare e prestazioni al 100%, (2) malfunzionamento e prestazioni allo 0%.*

Gli stati di degradazione intermedi fra i due estremi, dunque, vengono trascurati. I passi da seguire per ottenere un corretto Albero dei Guasti sono essenzialmente 4:

- Definire l'evento indesiderato che si vuol analizzare;
- Definire i **contorni del sistema**: in questa fase bisogna essere pratici andando a comprendere entro quali limiti fermare l'analisi, altrimenti si corre il rischio di occuparsi di tutti i problemi possibili perdendo il focus sull'evento iniziale, producendo un'analisi poco utile;
- Definire gli **eventi causali** da considerare, ossia quelli coinvolti nella genesi del top event;
- Definire qual è il modo di funzionamento **nominale** del sistema, poichè identifica lo stato iniziale del sistema.

Emerge chiaramente che effettuare una FTA richiede una conoscenza globale approfondita del sistema e dei suoi meccanismi, che può essere sviluppata solo grazie all'esperienza lavorativa. La Fault Tree Analysis richiede dunque un'elevata propensione alla **multidisciplinarietà** da parte di chi svolge l'analisi.

2.5.2 Hazard and Operability Study (HAZOP)

L'Hazard and Operability Study opera nel campo spesso indefinito, e pertanto complesso e potenzialmente pericoloso, esteso fra le condizioni di *funzionamento a progetto* note, e le condizioni *fuori progetto* che possono essere raggiunte nel corso della vita e del funzionamento del sistema, risultando poco note agli stessi progettisti. A causa di queste incertezze, la tecnica HAZOP risulta essere una metodologia di natura **qualitativa** che presenta sia elementi **deduttivi** come la ricerca delle cause, sia elementi **induttivi** come l'analisi delle conseguenze.

Lo scopo è quello di **effettuare una revisione accurata dei processi e delle loro procedure operative secondo un approccio sistematico in grado di definire se le deviazioni dalle condizioni di progetto possono determinare conseguenze indesiderabili**. Si è dimostrata molto efficiente nel caso di nuove tecnologie innovative caratterizzate da una scarsa esperienza, ma anche in applicazioni su tecnologie ben consolidate.

A livello normativo, lo standard utilizzato è stato definito dall'International Electrotechnical Commission e la versione aggiornata è la **IEC 61882:2016**. Esistono, però, molti altri standard soprattutto nell'ambito degli impianti industriali chimici e dovunque vengano utilizzate sostanze potenzialmente pericolose per la sicurezza e la salute delle persone e dell'ambiente.

L'essenza dell'HAZOP consiste nella revisione dei processi attraverso una serie di incontri di un **team multidisciplinare** che adotta un prestabilito protocollo per valutare metodicamente l'effetto delle deviazioni dalle condizioni operative di progetto, focalizzando l'attenzione su specifici punti definiti "*nodi studio*".

L'HAZOP Team, uno per volta, esamina ogni nodo ricercando le deviazioni potenzialmente pericolose che sono derivate da un set di opportune **parole guida**. Il concetto di base è che l'HAZOP debba essere sviluppata da un team interdisciplinare di esperti in grado di identificare problematiche complesse che, agendo separatamente, non potrebbero identificare. Pertanto, sebbene, una singola persona possa sviluppare l'analisi HAZOP di un processo, tale studio risulta limitato rispetto alla potenzialità della tecnica. In tale caratteristica l'HAZOP differisce da qualunque altra tecnica di valutazione del rischio perché, mentre gli altri approcci possono essere sviluppati da singoli analisti (sebbene in molti casi sia meglio impiegare un team interdisciplinare) l'HAZOP, per definizione, deve essere sviluppata da un team di individui ognuno con specifica differente preparazione tecnica. Un esperto team leader guida sistematicamente il team nello studio funzionale delle deviazioni dei parametri utilizzando un set di parole guida come, ad esempio: non, niente, di più, di meno, così come, parte di, al contrario, invece di etc. L'HAZOP richiede accurati ed aggiornati diagrammi, documenti tecnici ed altre dettagliate informazioni inerenti e processi e le procedure, affinché il team abbia a disposizione tutto il necessario per operare in maniera efficiente.

2.5.3 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

L'**Analisi dei modi e degli effetti dei guasti**, come indica il nome stesso, è una potente metodologia di tipo induttivo "**bottom-up**" che iniziando l'analisi a livello di componente è in grado di (1) determinare tutti i possibili modi in cui un componente può guastarsi; (2) analizzare le cause che hanno portato al guasto; (3) valutare quali siano gli effetti di tale guasto sull'intero sistema.

Queste caratteristiche rendono la tecnica FMEA uno strumento di verifica della qualità di un progetto sia dal punto di vista dell'Affidabilità sia della Sicurezza. Venne sviluppata intorno al 1950 presso la NASA all'interno del programma lunare APOLLO e, ben presto, si diffuse in tutti gli ambiti industriali, in particolare nel settore automotive. Nel tempo, sono stati molti gli standard e le norme che si sono succedute nella definizione di tale metodologia. Attualmente a livello normativo, gli standard utilizzati sono la **MIL-STD-1629** e la **SAE J1739**.

L'esecuzione della FMEA prevede che ogni parte del sistema venga accuratamente analizzata considerando le sue modalità di guasto con il calcolo della frequenza con cui si verificano ed i relativi effetti funzionali e sull'ambiente circostante. Come strumento di validazione del progetto la FMEA è esplicitamente prevista dalla norma UNI EN ISO 9004, relativa alla garanzia di qualità, quale strumento utilizzabile per la qualifica e la validazione di un progetto. Rispetto alla Fault Tree Analysis, la FMEA però presenta una forte limitazione, infatti analizza i guasti singolarmente uno ad uno, perdendo in questo modo di vista quale sia l'interazione e le possibili correlazioni tra i vari guasti. Per questo motivo, esprime il massimo del suo potenziale durante le prime fasi progettuali del sistema, poichè se dovesse risultare dall'analisi un guasto di severità tale da mettere in pericolo la sicurezza, allora, è necessario adottare tempestivamente delle misure atte a migliorare il sistema prima ancora che esso venga effettivamente realizzato. Esistono 3 differenti approcci con cui è possibile sfruttare la metodologia FMEA:

- **Functional Approach:** l'approccio funzionale è particolarmente consigliato nelle primissime fasi di design, poichè si tiene conto delle funzioni che devono essere svolte senza conoscere ancora quali siano precisamente i componenti presenti;
- **Hardware Approach:** l'approccio hardware rappresenta il passo successivo in cui, una volta nota la lista completa dei componenti presenti all'interno del sistema, è possibile procedere a studiare i modi di guasto, le cause e gli effetti di ogni singolo componente;
- **Process Approach:** l'approccio di processo si svolge ad un livello superiore rispetto ai precedenti, in quanto, prende in considerazione quelle che potrebbero essere le potenziali failures durante i processi coinvolti nello sviluppo e gestione del sistema (ad esempio il processo di assemblaggio).

Esiste anche una versione migliorata di questa metodologia che persegue un approccio più quantitativo e prende il nome di "FMECA". L'aggiunta di un'**analisi di criticità** permette di quantificare la gravità degli effetti di ciascun modo di guasto e quindi di classificare tutti i modi di guasto in base ad un certo indice.

2.5.4 Failures Mode, Effects and Criticality Analysis

All'interno della **FMECA**, l'esecuzione dell'Analisi di Criticità porta alla definizione di un **indice di criticità (CI)** che stima il rischio connesso al guasto. La disponibilità di dettagliate informazioni relative ai modi in cui un oggetto o un impianto può danneggiarsi durante la sua vita sul campo fornisce la possibilità di utilizzare lo strumento FMECA anche per analizzare e migliorare altre caratteristiche del prodotto non connesse alla sicurezza del suo impiego. Il punto fondamentale che differenzia la FMECA dalla FMEA è la definizione del **RISK PRIORITY NUMBER "RPN"**. Esso è definito come il prodotto:

$$RPN = O \cdot S \cdot D \quad (2.26)$$

Le grandezze coinvolte sono:

- **O - Occurrence:**

Rappresenta la stima della **probabilità di occorrenza** di una data modalità di guasto del componente. Sono possibili differenti metriche, ma la più diffusa prevede 10 differenti livelli;

- **S - Severity:**

Rappresenta la stima della **gravità** delle conseguenze potenziali del guasto. Anche in questo caso sono possibili differenti metriche, ma la più diffusa prevede 10 livelli;

- **D - Detectability:**

Rappresenta la stima della **rilevabilità** del guasto ed anche in questo caso sono presenti 10 livelli.

Maggiore risulterà essere il valore di RPN, tanto più immediata dovrà essere l'azione correttiva da intraprendere poichè il modo di guasto risulta avere un forte impatto sulla sicurezza del sistema. La possibilità di ordinare i modi di guasto per indice di criticità ed aggregarli per **Classi di Criticità** fornisce al progettista un utile strumento per identificare i provvedimenti da adottare per migliorare la qualità e le prestazioni degli apparati. E' possibile, inoltre, utilizzare la FMECA per valutare la manutenibilità e la testabilità di un sistema oltre che la possibilità di utilizzare questo strumento nella definizione del piano di manutenzione del sistema stesso.

Gli step necessari per effettuare una corretta e completa analisi FMECA sono:

- identificare tutti i componenti presenti all'interno del sistema;
- determinare tutti i possibili modi di guasto di ogni componente;
- determinare tutte le possibili cause per ogni modo di guasto;
- determinare tutti gli effetti che il modo di guasto può avere sul sistema;
- determinare la criticità di ogni modo di guasto andando a definire il valore dell'RPN identificando i valori di Occurrence, Severity e Detectability;
- fornire delle indicazioni su possibili azioni correttive e migliorative da intraprendere per abbassare il valore dell'RPN riportandolo all'interno di limiti ritenuti accettabili per il caso di studio analizzato.

Tutte le informazioni raccolte e prodotte durante lo svolgimento dell'analisi FMECA possono, infine, essere raggruppate e raccolte all'interno di una tabella che può presentare struttura differente a seconda dello scopo dell'analisi effettuata, del sistema considerato, e molti altri fattori. Un semplice esempio della struttura di queste tabelle è riportato di seguito.

1. N° di identificaz. del componente	2. Funz. del componente	3. Modi di guasto	4. Cause di guasto	5. Effetti di guasto	6. Criticità			7. Azioni correttive
					Gravità	Rilevaz.	Freqz.	
.
.
.
.
.
.

Figura 2.13: Esempio Tabella analisi FMECA

Per quel che riguarda la definizione del RPN esso può assumere un significato qualitativo nel momento in cui i valori di O S e D vengono scelti secondo le valutazioni e l'esperienza personale di chi svolge l'analisi. Se, invece, si dovessero conoscere con precisione dati come, ad esempio, il tasso di guasto inerenti ad ogni singolo componente, allora è possibile ottenere un'analisi quantitativa che assume un peso specifico ed un'importanza ben superiore rispetto al caso precedente. Nel campo della certificazione, a seconda delle operazioni che il sistema dovrà compiere, può essere richiesta una semplice analisi qualitativa oppure una più specifica analisi quantitativa, specialmente nel caso di sistemi complessi che vedono coinvolte attivamente persone durante lo svolgimento delle operazioni.

Capitolo 3

PRO S3, Eccellenza Italiana

3.1 L'azienda

PRO S3 nasce nel 2001 a Torino, su iniziativa dei tre soci fondatori forti dell'esperienza accumulata in anni di studi e ricerche presso il Politecnico di Torino.

PROfessional Services, Systems & Support – Servizi professionali di supporto allo sviluppo di sistemi. Questa è l'anima dell'azienda, la cui essenza è nel nome: PRO S3. Le competenze sviluppate in realtà multidisciplinari permettono di offrire elevate capacità di progettazione, simulazione e sviluppo al servizio dell'industria aerospaziale, automotive e manifatturiera. L'innovatività dell'azienda ha permesso di essere selezionata nell'Incubatore Imprese Innovative del Politecnico di Torino dall'anno 2002. L'esperienza acquisita nello sviluppo dei prodotti lungo l'intero ciclo produttivo, dall'idea di partenza alla messa sul mercato, ha portato l'azienda dal 2005 ad intraprendere la strada dello sviluppo di una propria linea di velivoli senza pilota per il mondo della **sicurezza**, dell'**osservazione del territorio** e del **trasporto di piccole merci**. Dal 2010, anno di consegna del primo Aeromobile senza pilota interamente sviluppato in-house, l'azienda ha iniziato a partecipare ad importanti progetti di ricerca nazionali ed internazionali nel mondo delle applicazioni avanzate in ambito aerospaziale. Tra gli altri, ha partecipato ai progetti **SMAT & STEP**, per la diffusione dell'uso dei velivoli senza pilota in ambito **urbano**. Grazie alla partecipazione al progetto **GAP** (Global Access Program) presso la UCLA (University of California Los Angeles), l'azienda ha avuto modo di mettersi alla prova sul mercato USA che come risultato risulta essere estremamente competitivo e all'avanguardia. Nel 2020, durante la crisi dovuta all'epidemia da **SARS-CoV-2**, sono state sviluppate numerose collaborazioni con aziende internazionali per il **trasporto di materiale sanitario**. La costante voglia di innovazione ha portato la PRO S3 nel 2021 ad aggiungere un importato tassello alla sua già ampia offerta di servizi per il cliente, dando vita al **laboratorio di realtà virtuale ed aumentata**.

3.2 Mission and Vision

La visione dei membri, fin dalla fondazione dell'azienda, è sempre stata quella di **continuare ad essere in anticipo sui tempi.**

La presenza di professionisti con skills diverse e trasversali, permette di affrontare sfide sempre più difficili con l'unico obiettivo di dar vita a qualcosa di innovativo e all'avanguardia. Le competenze di progettazione, calcolo e simulazione derivanti dall'industria aerospaziale, hanno permesso di sviluppare un *know-how* tale da poter essere messo a disposizione dei clienti più esigenti, nella ricerca di nuove strade e soluzioni che conducano verso un futuro in cui uomo e macchine siano sempre più in sinergia.

3.3 Ambiti operativi

3.3.1 Settore Automotive

La PRO S3 è in grado di fornire supporto durante tutte le attività di sviluppo, dagli studi di pre-fattibilità sino all'avvio di produzione. I punti focali in cui l'azienda è in grado di fare la differenza spaziano dall'impostazione veicolo e fattibilità, fino alla progettazione e sviluppo di vari componenti come scocca, parti mobili, interni, esterni, sedili, struttura, ma anche simulazioni di aerodinamica e termo-fluidodinamica.

3.3.2 Impianti industriali

In ambito industriale, l'azienda si occupa principalmente di attrezzature, componenti ed apparecchiature specialistiche, verifiche strutturali, analisi di fluidodinamica, ma anche supporto documentale e certificazioni di prodotto.

3.3.3 Settore Aerospaziale

Il settore Aerospaziale è certamente il fiore all'occhiello dell'azienda, poichè si occupa di moltissimi ambiti: dalle aerostrutture, alle verifiche strutturali, alla progettazione e testing di valvole, martinetti, gearboxes, analisi di fluidodinamica, studi RAMS, ma anche documentazione digitale e realtà virtuale ed aumentata.

Capitolo a se stante ovviamente è quello che riguarda lo sviluppo e produzione di velivoli in-house, ovvero interamente progettati e prodotti all'interno dell'azienda. Tale capacità rende la PRO S3 un'azienda di spicco nel mondo dei velivoli senza pilota, una vera e propria eccellenza Italiana ed Internazionale.

3.4 Prodotti d'eccellenza

La spinta innovativa continua da parte dell'azienda, le ha permesso, negli anni, di ampliare il catalogo dei velivoli senza pilota prodotti in-house, andando così a competere all'interno di differenti segmenti di mercato. PRO S3, infatti, è attualmente in grado di fornire soluzioni estremamente variegata a seconda delle esigenze e del budget del cliente, grazie all'elevata capacità di saper adattare i propri velivoli ai più disparati compiti ed utilizzi. Attualmente, i prodotti di punta dell'azienda risultano essere 3, un velivolo ad ala fissa, un multirottore ed un convertiplano.

3.4.1 WAVESIGHT

WaveSight è un **aeromobile ad ala fissa** a pilotaggio remoto flessibile, piccolo e ad altissime prestazioni. Il decollo di *WaveSight* avviene mediante catapulta automatica: il decollo assistito da catapulta pneumatica, oltre a svincolare l'operatore dalla responsabilità di un decollo con lancio a mano, consente operazioni di volo anche in assenza di piste di decollo. La catapulta pneumatica consente operazioni sicure e prestazioni non raggiungibili mediante altri sistemi, non in grado di garantire la costanza delle prestazioni al variare delle temperature e con l'invecchiamento.



Figura 3.1: Velivolo Wavesight sul sistema di lancio a catapulta

Grazie a un numero di componenti ridotto, WaveSight può essere preparato per il volo in **meno di 5 minuti**. L'assenza di collegamenti elettrici volanti fra le parti e le particolari caratteristiche di progettazione rendono impossibili errori di assemblaggio. Con un peso massimo al decollo di 9,5 kg e ben 3,5 kg di payload possibile, il suo principale utilizzo è quello di Sistema **Mapper** grazie alle sue elevate prestazioni che gli permettono in condizioni di volo favorevoli di rimanere in volo anche per **150 minuti**. Il volo può essere completamente automatico con pianificazione a waypoint e gestione della quota ma è possibile anche la ripianificazione in volo.

3.4.2 VENTURE LE

Venture LE rappresenta la più evoluta versione di **velivolo multirottore** prodotto dall'azienda. Nasce per essere usato con facilità: braccia ed eliche ripiegabili per il trasporto agevole, con ingombri estremamente ridotti. Il tempo di preparazione al volo è all'incirca di due minuti. Le batterie sono sostituibili in modo facile e veloce grazie al sistema di aggancio "plug-in".



Figura 3.2: Velivolo Venture LE in versione Mapper

I principali utilizzi sono in versione **Mapper** e in versione **SAR** inoltre, l'installazione di luci di navigazione (rossa/verde(bianca)), rendono il velivolo compatibile per il volo notturno. Le elevate prestazioni e l'autonomia di volo di circa 40 minuti lo rendono un sistema estremamente versatile ed in grado di adattarsi alle richieste dei clienti più esigenti, sia civili che militari.

3.4.3 ICON V2 MY2022

ICON V2 MY2022 rappresenta la massima espressione delle competenze sviluppate dalla PRO S3. Si tratta di un velivolo **convertiplano** in grado di effettuare decollo ed atterraggio verticale grazie alla configurazione quadricottero e di volare in crociera grazie all'elica spingente. Il passaggio da una modalità di volo all'altra è un'operazione difficile e viene controllata da un'elettronica molto sofisticata.



Figura 3.3: Velivolo ICON V2

Con un peso massimo di 13 kg, è utilizzato in versione **Mapper**, **SAR** e per il **trasporto di piccole merci**, fino ad un massimo di 2 kg ed un volume di $3dm^3$.

Capitolo 4

Analisi del Venture LE

4.1 Architettura di sistema

Il Venture LE (Long Endurance) presenta una classica architettura multi-rotore composta da 4 motori disposti all'estremità di bracci ripiegabili disposti ad X. Il corpo centrale della struttura è composto da lamine di carbonio fresate e componenti in lega Avional 2024. La scocca in plastica esterna garantisce una completa protezione da polvere e pioggia leggera, permettendo così l'utilizzo in ambienti gravosi. I bracci, composti da tubi in carbonio e gli alloggi per i motori specificamente sviluppati dall'azienda, sono fissati al corpo centrale attraverso delle ghiera in metallo rendendo le operazioni di apertura e chiusura degli stessi estremamente semplice e veloce. A livello hardware, la scelta del sistema di autoguida, ovvero l'autopilota, è ricaduta sul Cube Orange, prodotto di punta dell'azienda CubePilot, in grado di garantire elevate prestazioni grazie alla presenza al suo interno di 3 differenti IMU (Inertial Measurement Unit) in ridondanza calda, doppio barometro, bussola e stabilizzate in temperatura. Il Firmware installato al suo interno è quello open di ArduPilot, con le opportune modifiche del caso. Prodotti CubePilot sono stati utilizzati anche nel caso della carrier board, della ricevente e del gps, nello specifico per gli ultimi due sono stati utilizzati i componenti "Herelink" ed "Here 3". La ricevente cattura il segnale radio proveniente da terra con una frequenza di 2.4 Ghz ed al contempo si occupa di trasmettere a terra dati inerenti la telemetria. Elementi di fondamentale importanza sono poi la PDB (Power Distribution Board) e l'ESC, quest'ultima prodotta da T-Motor. I Motori elettrici brushless, prodotti dalla Madcomponents, presentano elevate prestazioni anche grazie alla loro certificazione IP35 contro polvere ed acqua. La batteria agli ioni di litio, prodotta dalla Tattu, presenta livelli di efficienza tali da garantire fino a 45 minuti di autonomia in volo. Sono presenti, inoltre, tutta una serie di sensori facilmente intercambiabili come i laser di prossimità, necessari ad evitare possibili collisioni soprattutto durante la fase di atterraggio. Le luci di navigazione, secondo lo standard rossa/verde/bianca rendono il velivolo compatibile con il

volo notturno, mentre le strobelights anticollisione garantiscono la massima visibilità anche a distanze elevate [1]. L'Emcotec Safety Power Switch è un sistema magnetico a chiavetta che attiva/disattiva il sezionatore elettronico digitale, svolgendo in questo modo il fondamentale compito di garantire l'accensione in sicurezza del velivolo, scongiurando inoltre l'ossidazione dei connettori. La presenza di questa chiave risulta indispensabile per garantire la massima sicurezza durante le operazioni a terra di preparazione al volo, infatti, una volta collegata la batteria al sistema, il velivolo rimane completamente spento ed inerme fino a quando la chiave magnetica non viene rimossa, evitando, ad esempio, incidenti dovuti all'avvio accidentale dei motori mentre si maneggia il velivolo. Il payload, infine, può essere di vario tipo a seconda delle esigenze del cliente. Il Venture LE, però, esprime il massimo del suo potenziale nelle configurazioni "Mapper" e "Sar"; nel primo caso il payload è composto da una camera ad alta risoluzione gimbal, mentre nel caso di missioni di ricerca e soccorso presenta una torretta girostabilizzata con zoom ottico e sensore termico. Il payload è direttamente gestito dall'autopilota seguendo i comandi impostati dall'operatore.

4.2 Metodologia

In Europa, la messa in vendita sul mercato di un macchinario, qualunque esso sia, richiede il possesso del marchio CE in accordo con quanto stabilito all'interno dell'European Directive on Machinery 2006/42/EC [18]. All'interno di questo documento si afferma che devono essere svolte opportune tecniche di Gestione del Rischio. In quest'ottica, è possibile perseguire la sicurezza funzionale di un sistema complesso basando il proprio lavoro sulla scelta tra due differenti standard internazionali: quello rilasciato dall'Organizzazione Internazionale per la Normazione (ISO) oppure, quello fornito dalla Commissione elettrotecnica internazionale (IEC). Gli standard ISO/IEC sono fortemente raccomandati in questo tipo di analisi poiché permettono di ottenere i certificati di conformità alle normative pertinenti garantendo così la sicurezza del pubblico cittadino. Ovviamente gli standard ISO/IEC forniscono anche una metodologia appropriata per effettuare la Valutazione del Rischio, ovvero l'analisi preliminare alla base della Gestione del Rischio. Il seguente lavoro si pone dunque l'obiettivo di applicare una metodologia che sia in grado di effettuare una Valutazione e Gestione del Rischio, fornendo in ultima analisi alcuni consigli e direttive per ridurre le situazioni di potenziale pericolo. Le analisi che verranno esposte ipotizzano l'utilizzo del sistema Venture LE all'interno di un contesto urbano. Il velivolo, in configurazione mapper, si occuperà di svolgere una missione di fotogrammetria per scopi di verifica catastale sugli immobili presenti all'interno dell'area metropolitana di Torino. Questo approccio permetterà di mettere alla luce punti di forza e debolezze del sistema, fornendo interessanti punti di crescita per migliorarsi attraverso un continuo processo di rinnovamento nelle tecnologie e nelle soluzioni utilizzate.

L'approccio utilizzato prevede la combinazione di due differenti standard:

- **ISO 12100:** Safety of machinery-general principles for design-risk assessment and risk reduction [11];
- **ISO 13849:** Safety of machinery, safety-related parts of control systems, General principles for design [12].

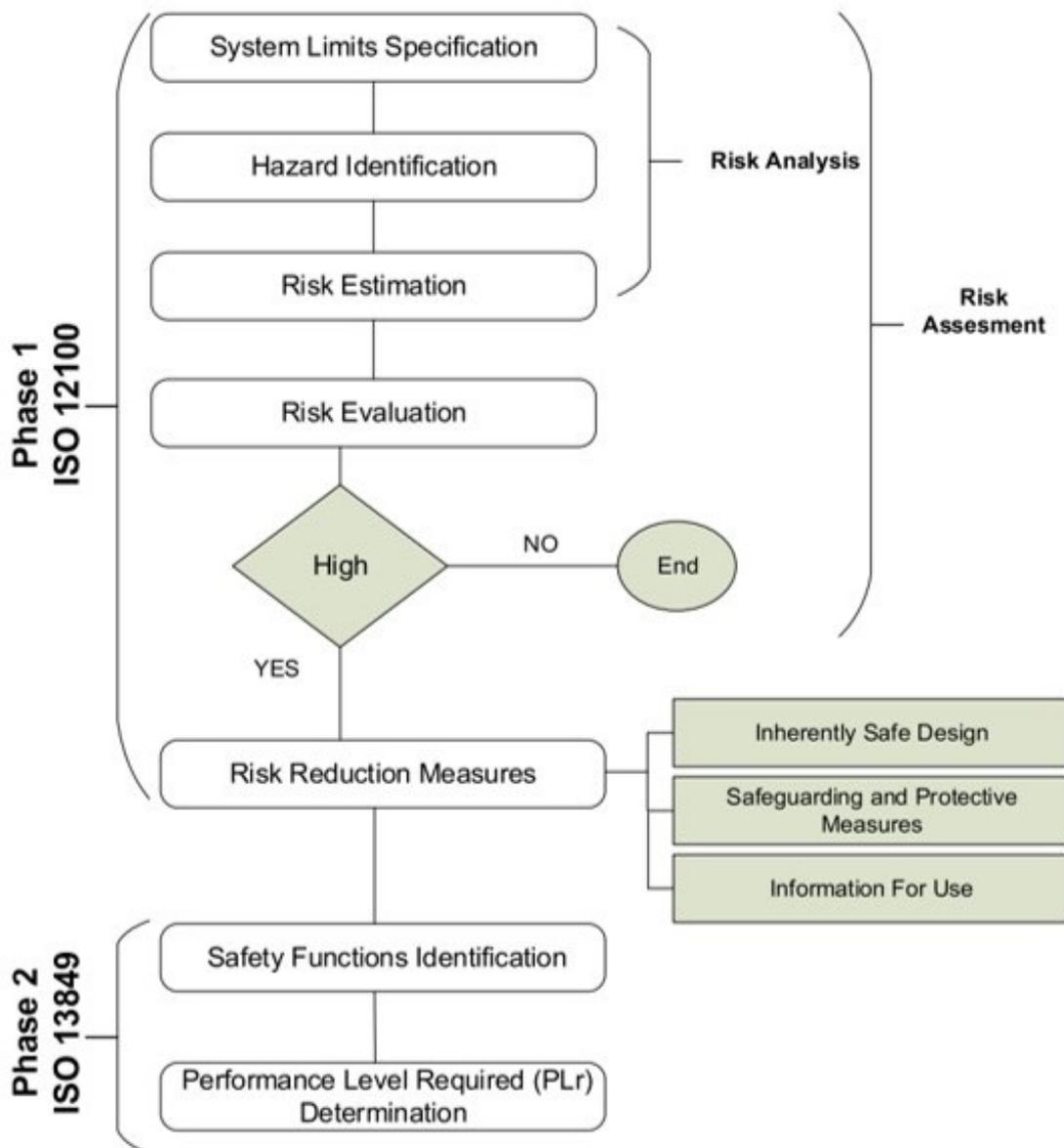


Figura 4.1: Struttura Metodologia basata sugli standard ISO 12100 ed ISO 13849

Come si evince dal grafico in Figura 4.1, lo standard ISO 12100 permette di fornire una valutazione accurata dei rischi durante l'utilizzo di un sistema UAV e fornisce inoltre alcune misure per la riduzione del livello di rischio. Lo standard ISO 13849, invece, permette di determinare i livelli di performance richiesti (PLr) [3]. Le singole fasi si sviluppano secondo quanto segue.

4.2.1 Risk Analysis

L'analisi del rischio si sviluppa a partire dalla definizione dei **limiti di sistema**. Secondo quanto riportato da [19], i limiti di un Sistema UAV possono essere suddivisi in cinque differenti categorie: (1) *limiti fisici*, (2) *limiti temporali*, (3) *limiti ambientali*, (4) *limiti comportamentali* e (5) *limiti di connessione*. Successivamente si procede con l'**identificazione dei pericoli**. Questa fase considera i pericoli a cui può essere sottoposto un UAV come appartenenti a due macro categorie a seconda della loro origine: (1) *pericoli esterni* e (2) *pericoli interni*. A loro volta, esse si suddividono in una pletera di sotto-categorie individuabili attraverso metodi *reattivi*. Questi metodi prevedono principalmente lo studio accurato ed approfondito di database riguardanti incidenti ed inconvenienti stilati da organizzazioni quali FAA, NTSB e AIDS. Vengono inoltre analizzati i documenti inerenti i report di volo e sulla sicurezza, i report di manutenzione, sondaggi di vario genere e forum online specializzati. Alcuni esempi di lavori in cui questi metodi reattivi sono stati utilizzati in maniera efficace per ottenere risultati rilevanti sono [10], [4], [24] e [8]. Il passo successivo risulta essere la **stima dei rischi**, la quale identifica la *probabilità* di accadimento e la *severità* delle conseguenze relative al verificarsi delle situazioni di pericolo identificate in precedenza. Come spiegato nel dettaglio all'interno della Sezione 2.5 riguardante la Safety, questa procedura è possibile attraverso l'utilizzo della Matrice di rischio presente in Figura 2.11. È doveroso precisare che la definizione della severità può essere facilmente suscettibile a pregiudizi ed assunzioni errate. Essa infatti viene definita sulla base del giudizio di chi compie l'analisi, e ciò può portare in alcuni casi ad interpretazioni errate del fenomeno. Per questo motivo, vengono definite in maniera esplicita le seguenti classi di gravità, rese ancor più chiare da alcuni esempi pratici:

- **Catastrofico:** l'evento comporta *gravi ferite* o addirittura la *morte* di esseri umani. Un chiaro esempio di una situazione potenzialmente catastrofica potrebbe essere lo schianto al suolo del drone lungo una strada percorsa da auto e pedoni; a seguito dello schianto potrebbero essere coinvolti dei pedoni oppure potrebbe verificarsi un'incidente stradale con conseguenze per l'appunto catastrofiche.
- **Critico:** l'evento comporta il danneggiamento di beni immobili appartenenti a terzi. L'esempio più semplice ed immediato è la collisione in volo del drone con un edificio, con conseguente danneggiamento della struttura.

- **Marginale:** l'evento comporta il danneggiamento esclusivo del velivolo stesso. Un evento simile può verificarsi, ad esempio, durante un atterraggio in cui il malfunzionamento dei sensori di altitudine comportano lo schianto al suolo.
- **Trascurabile:** l'evento non comporta problemi sostanziali sull'operatività del velivolo ma ne riduce parzialmente le prestazioni. Ad esempio, il malfunzionamento di una IMU, comporta una riduzione delle prestazioni del drone che rimane comunque in grado di volare ed operare.

Per quanto riguarda la probabilità di accadimento, invece, in accordo con quanto definito anche all'interno della MIL-STD-882E, sono possibili 5 differenti livelli: (1) *frequente*, (2) *probabile*, (3) *occasionale*, (4) *remota*, (5) *improbabile*.

Al termine di questa fase iniziale di Analisi del Rischio, si ottiene un elenco prioritario dei pericoli e del loro corrispondente livello di rischio.

4.2.2 Risk Evaluation

Nella fase di Valutazione del Rischio, l'elenco prioritario viene analizzato portando alla luce tutti i rischi che risultano essere non accettabili per la sicurezza, preparandoli così alla fase successiva di riduzione del rischio. Per quei pericoli che risultano invece accettabili l'analisi si conclude in questa fase e non è necessario proseguire oltre.

4.2.3 Risk Reduction Measures

L'ultimo step definito dalla Norma ISO 12110 riguarda la definizione di misure per la riduzione del rischio. Secondo quanto riportato nel lavoro di Jespen [14], per ottenere una mitigazione efficace del rischio è necessario provare ad intervenire in successione su 3 differenti livelli: il primo prevede di agire a livello di design durante la fase progettuale del drone, in modo da garantire a progetto contromisure adeguate al rischio; il secondo prevede l'introduzione a posteriori di soluzioni in grado di ridurre il livello di rischio ad un livello accettabile; se non dovesse bastare questo, il terzo ed ultimo livello prevede di generare adeguati documenti di informazione per l'uso.

I risultati ottenuti al termine di questa fase iniziale risultano essenziali per introdurre le misure di protezione impiegando funzioni di sicurezza, dette anche "Safety-Related Parts of Control Systems" (SRP/CS). Questo comporta la definizione di specifiche di sicurezza e guide per la determinazione dei livelli appropriati di Sicurezza Funzionale sotto forma di *livelli di performance richiesti* (in inglese "required Performance Level" (PLr)). Nel dettaglio, queste operazioni sono descritte dalla norma ISO 13849.

4.2.4 Safety Function Identification

Il primo passo definito dalla norma ISO 13849 è quello di identificare le funzioni di sicurezza da applicare attraverso gli SRP/CS. Le funzioni di sicurezza possono essere utilizzate come misure di salvaguardia e protezione e le informazioni necessarie possono essere ricavate facilmente dai risultati delle misure per la riduzione del rischio ottenuti nel passo precedente.

4.2.5 Performance Level required Determination

Una volta identificate le funzioni di sicurezza, è necessario calcolare il livello di prestazione richiesto (PLr) per specificare la capacità delle parti del sistema di svolgere una funzione di sicurezza in condizioni prevedibili [12]. In altre parole, il PLr si riferisce al livello di prestazione che deve essere applicato per ottenere la riduzione del rischio richiesta per ciascuna funzione di sicurezza. La procedura utilizza il grafico presentato in Figura 4.2, andando a stimare tre parametri:

- **Severity of possible injury (S)**: nel caso in cui la gravità delle possibili lesioni risulti elevata allora si seleziona S2, mentre se ridotte si sceglie S1;
- **Frequency of exposure to hazard (F)**: nel caso in cui la frequenza di esposizione al pericolo è elevata si sceglie F2, altrimenti se è bassa, F1;
- **Possibility of avoiding the hazard (P)**: Si seleziona P1 se è realmente possibile evitare un incidente o ridurre significativamente le sue conseguenze, mentre P2 è da selezionare nel caso in cui non fosse possibile evitare il verificarsi dell'evento e delle sue conseguenze.

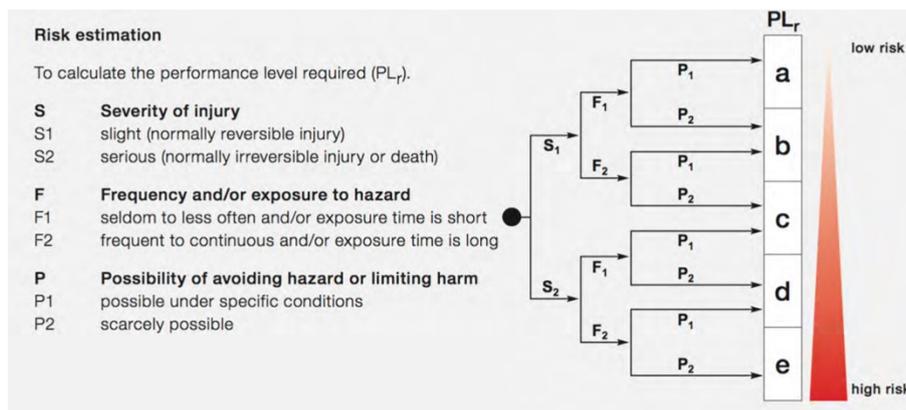


Figura 4.2: Grafico di rischio per la determinazione del PLr

Al termine del processo si ottiene un valore di PLr suddiviso in cinque categorie "a-e", dove "a" indica la necessità di prestazioni modeste mentre "e" richiede prestazioni da parte dei SRP/CS particolarmente elevate.

4.3 Applicazione del metodo

Di seguito sono riportate delle tabelle riassuntive dei risultati ottenuti attraverso l'applicazione del metodo appena descritto.

La prima tabella riguarda l'individuazione dei **limiti del sistema UAV**.

Natura	Descrizione dei limiti
Limiti fisici	Peso massimo al decollo, velocità massima, altezza minima e massima.
Limiti temporali	Massima durata di volo, tempo di risposta ai comandi, tempo di acquisizione dei sensori, degrado della batteria e vita della batteria.
Limiti ambientali	Condizioni meteorologiche come velocità del vento, presenza di polvere, pioggia, neve, condizioni di illuminazione (giorno o notte), presenza di strutture all'interno di aree popolate, distanza dagli aeroporti.
Limiti comportamentali	Azioni compiute dal pilota, sia esso in configurazione autonoma o manuale.
Limiti di connessione	Latenza del segnale, fenomeni di jitter, larghezza di banda disponibile, interferenze.

La seconda tabella riguarda l'**identificazione dei pericoli**, esterni o interni.

Sorgente	Tipologia	Esempi
Esterna	Interferenza	Interferenza elettromagnetica (EMI), Interferenza nelle comunicazioni, interferenza umana (eavesdropping del segnale radio).
	Condizioni ambientali	Vento, temperatura, attenuazione atmosferica, ghiaccio, precipitazioni, visibilità (di giorno o di notte).
	Ostacoli	Ostacoli fissi (alberi, tralicci, cavi elettrici, edifici) ed ostacoli dinamici (uccelli, macchine).
	Ambiente di navigazione	Perdita/Errore del segnale GPS, GPS Spoofing (hackeraggio della posizione), Errore sistema di navigazione, Waypoint errato.
	Traffico aereo	Presenza di un altro velivolo nello spazio aereo circostante, presenza di spazi aerei di classe differente nelle vicinanze.
	Ambiente elettrico	Fenomeni Elettrostatici, campi RF naturali o generati dall'uomo come le HIRTAs (High Intensity Radio Transmission Areas).
	Comunicazioni	Fenomeni di ritardo, jitter, disponibilità di banda.
Interna	Fattori umani	Errori del pilota dovuti ad inesperienza, insufficiente conoscenza della zona, fatica, fretta, attacchi alla sicurezza sulla ground station, sul data-link, sull'UAV, mancanza di consapevolezza delle cultura della sicurezza.
	Meccanica	Rotture dei componenti meccanici quali motori, eliche, attuatori, struttura.
	Termica	Esplosioni, congelamento.
	Elettronica	Perdita di potenza, saturazione, overflow, failure della propulsione.
	Algoritmica	Errori nella verifica, nel processo di decision-making, risposte in ritardo, loop infiniti.
	Fattore tecnico	Esaurimento della batteria, celle della batteria difettose, malfunzionamenti tecnici dovuti al design o alla produzione, cicli di ricarica inappropriati, perdita di controllo, perdita delle trasmissioni.
	Software	Failure sistema di controllo, errori nel sistema di volo, errori dell'autopilota, presenza di bug nei codici, errori di processo.
Hardware	Errori nella CPU, nell'avionica di bordo, nei sensori di volo.	

Infine la tabella riportata nelle pagine seguenti racchiude alcuni dei risultati più rilevanti delle analisi condotte nei passi successivi indicati dalle norme ISO 12100 ed ISO 13849. Di particolare interesse risultano essere le colonne inerenti il **livello di rischio**, le **misure di riduzione del rischio** e del **livello di prestazione richiesto** nel caso di contromisure da implementare.

Analisi del Venture LE

Identificazione dei pericoli										Norma ISO 12100								
PERICOLO	SORGENTE	TIPOLOGIA	SOGGETTO	CAUSE	CONSEGUENZE	PROBABILITÀ	SEVERITÀ	LIVELLO DI RISCHIO	Misure di riduzione del rischio									
									MISURE DI RIDUZIONE DEL RISCHIO	MODIFICHE NEL DESIGN	SISTEMI DI TUTELA E PROTEZIONE	INFORMAZIONI PER L'USO	S	F	P	PL		
Perdita temporanea del segnale GPS durante il volo	Esterna	Interferenza	UAV	Interferenza, sovrasto nei pressi di costruzioni molto alte, tunnel, sottopassaggi, stazioni di trasmissione radio....	Perdita temporanea del controllo sulla navigazione, instabilità dell'UAV, piccole deviazioni dal percorso stabilito	Probabile	Trascurabile	Medio	Utilizzare dispositivi GPS di alta qualità, come gli RTK	X								
Perdita permanente del segnale GPS durante il volo	Interna	Electronica	UAV	Guasto dell'apparecchiatura GPS, assenza di alimentazione, errore software nella trasmissione dati	Perdita di controllo, collisione contro altri sistemi UAV, contro costruzioni, impatto al suolo con possibile coinvolgimento di esseri umani nel caso di zone densamente popolate, danneggiamento dell'UAV	Rare	Catastrofica	Serio	Utilizzare dispositivi GPS di alta qualità, RTK	X								
	Esterna	Interferenza	UAV	Presenza di un forte segnale di interferenza radio nell'area di servizio	Perdita temporanea delle informazioni a monitor, perdita occasionale dei comandi, collisione con strutture danneggiamento dell'UAV	Occasionale	Critica	Serio	Monitoraggio qualità comunicazioni nel time Utilizzo di dispositivi di alta qualità, amplificare testati e validati	X								
Qualità comunicazioni degradata	Esterna	Comunicazioni	UAV, GCS	Ritardi, jitter, banda limitata	Perdita di controllo, manovre e traettorie errate, schianto contro costruzioni, ostacoli, ferimento di esseri umani	Probabile	Catastrofica	Alto	Meccanismi di sicurezza		X							
	Comunicazioni	UAV, GCS	Condizioni ambientali avverse	Perdita di controllo, manovre e traettorie errate, schianto contro costruzioni, ostacoli, ferimento di esseri umani	Probabile	Catastrofica	Alto	Inspezioni preventive				X						
Perdita permanente delle comunicazioni con la Ground Station	Esterna	Comunicazioni	UAV, GCS	Guasto sistema antenna/ricevente, perdita di potenza, errore software nella trasmissione dati	Perdita di controllo del drone ed utilizzo per scopi criminali	Probabile	Critica	Alto	Utilizzo di antenne e ricevitori di alta qualità	X								
	Interna	Electronica	UAV, GCS	Guasto sistema antenna/ricevente, perdita di potenza, errore software nella trasmissione dati	Perdita di controllo del drone ed utilizzo per scopi criminali	Probabile	Critica	Alto	Analisi prestazioni attraverso i log files				X					
Attacco alla sicurezza	Esterna	Software	UAV, GCS	Protocollo di comunicazione non sicuro	Perdita di controllo del drone ed utilizzo per scopi criminali	Probabile	Critica	Alto	Aumentare il livello di sicurezza del protocollo	X								
									Mechanismi di sicurezza		X							

Nello specifico, la determinazione dei livelli di rischio (ed il colore ad esso annesso) si è basata sulla seguente matrice di punteggio della valutazione del rischio:

Severity \ Probability	Catastrophic	Critical	Marginal	Negligible
Frequent	High	High	Serious	Medium
Probable	High	High	Serious	Medium
Occasional	High	Serious	Medium	Low
Remote	Serious	Medium	Medium	Low
Improbable	Medium	Medium	Medium	Low
Eliminated	Eliminated			

Figura 4.3: Matrice valutazione del rischio secondo la norma ISO 12100

Andando a raggruppare i risultati ottenuti dall'analisi emerge che, tra tutti i pericoli identificati e studiati, nel 40% dei casi essi comportano un livello di rischio **Alto**, nel 40% un livello **Serio** e solamente nel 20% dei casi un livello **Medio**.

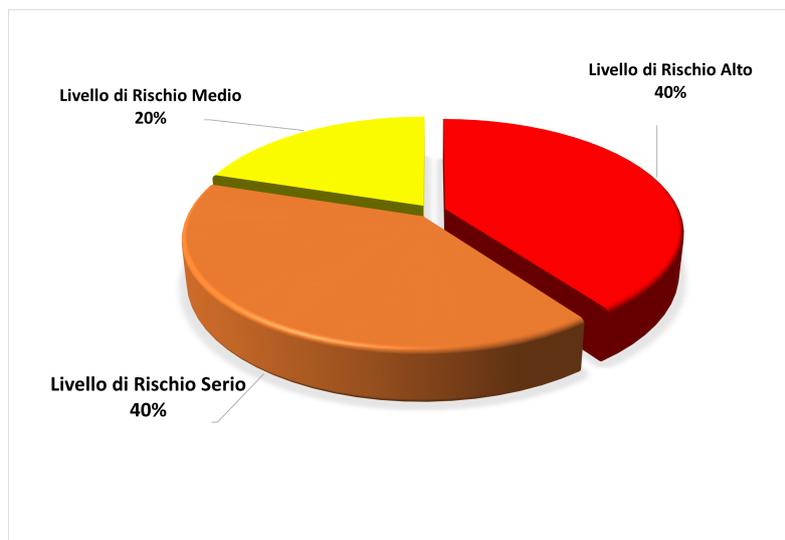


Figura 4.4: Suddivisione livelli di rischio dei possibili pericoli

Per concludere, è doveroso rimarcare ancora una volta che, trattandosi di una prima analisi qualitativa di alto livello, i risultati ottenuti potrebbero variare a seconda del giudizio del lettore, che potrebbe avere idee e conoscenze differenti rispetto a quelle riportate all'interno di questo lavoro.

Capitolo 5

Conclusioni

Il lavoro esposto presenta in maniera efficace ed ordinata il corretto modo di approcciarsi ad un problema ingegneristico. Durante la prima fase è necessario approfondire la conoscenza del sistema in esame, andando a comprenderne la storia, le caratteristiche, le funzionalità e le regole che lo governano. Nella seconda fase, invece, è necessario conoscere e prendere dimestichezza con gli strumenti che permettono di affrontare il problema, evidenziando quali potrebbero essere le strategie da applicare. Infine, nella terza fase, le conoscenze accumulate fino a quel momento si concretizzano nella definizione di una metodologia che, una volta applicata, permette di affrontare e risolvere in maniera efficiente il problema.

In questo caso, la prima fase ha previsto lo studio dei sistemi UAV al giorno d'oggi maggiormente diffusi, mettendone in luce le caratteristiche di maggior interesse a livello tecnico e normativo. La seconda fase ha previsto, a sua volta, una panoramica generale delle tecniche di Analisi RAMS che permettono lo studio rigoroso di alcune caratteristiche dei sistemi come l'Affidabilità e la Sicurezza. Un focus su alcune delle tecniche maggiormente utilizzate, si è rivelato necessario per meglio comprendere l'ambiente di studi in questione. L'ultima fase, infine, ha previsto la definizione di una metodologia rigorosa, che una volta applicata, ha permesso di ottenere uno studio preliminare sulla Valutazione e la Gestione del Rischio nel caso in cui venisse utilizzato un sistema UAV all'interno di un contesto urbano popolato. La metodologia utilizzata è stata ricavata applicando le direttive fornite dalle norme attualmente vigenti nel campo della valutazione del rischio, ovvero le norme ISO 12100 e ISO 13849. I risultati hanno fatto emergere che, nella quasi totalità dei casi, nel momento in cui si verifici un pericolo per il sistema, le possibili conseguenze ad esso connesse risultano essere assolutamente da evitare, poiché potrebbero in molti casi coinvolgere persone, ferendole, e strutture, danneggiandole. Solo in pochi casi, il verificarsi del pericolo comporta dei rischi accettabili poiché inerenti esclusivamente l'integrità del sistema. La completa assenza di livelli di rischio basso è da ricondursi alla scelta di considerare in ogni

situazione le peggiori conseguenze possibili così da poter generare le migliori contromisure possibili, rendendo il sistema sicuro ed affidabile. Per citare un esempio, onde evitare i pericoli relativi alla perdita del segnale GPS, l'azienda PRO S3 fin dall'inizio ha previsto a livello progettuale la possibilità di installare a bordo del Venture LE un sistema RTK, garantendo in questo modo al sistema delle prestazioni nettamente superiori rispetto ad una configurazione standard. Altre possibili contromisure potrebbero essere quelle di installare a bordo un paracadute e redigere un manuale d'uso all'interno del quale venga posta l'attenzione su tutte quelle accortezze che il pilota dovrà osservare prima, durante e dopo l'utilizzo del sistema, così da minimizzare l'esposizione ai pericoli. Grazie alle conoscenze sviluppate dall'azienda nell'ambito della realtà virtuale ed aumentata, tale manuale è stato sostituito da simulazioni realistiche e dettagliate che permettono al pilota di esercitarsi sulle procedure di assemblaggio, manutenzione e più in generale sull'utilizzo del sistema, garantendo così una maggior dimestichezza con i componenti rispetto ad un semplice studio cartaceo.

Per concludere, è necessario sottolineare che uno studio preliminare qualitativo di questo genere non è esaustivo per dimostrare la sicurezza e l'affidabilità del sistema, ma deve essere affiancato da uno studio quantitativo in grado di dare seguito a quanto analizzato. Il lavoro futuro dovrà dunque proseguire andando a sviluppare uno studio quantitativo del sistema, che al giorno d'oggi, però, presenta forti limitazioni. Volendo, ad esempio, applicare tecniche di studio dell'affidabilità come la FTA o la FMECA, esse necessitano di dati certificati tra cui i tassi di guasto dei vari componenti ed è qui che si incontra la prima grossa difficoltà: i componenti presenti all'interno del sistema risultano essere componenti commerciali, detti anche "COTS", e per questo motivo non sono provvisti di dati ufficiali inerenti i tassi di guasto. Per ovviare a questo problema sarebbe necessario utilizzare il sistema in maniera intensiva per un periodo di tempo sufficientemente lungo da permettere di ricavare i dati necessari completamente in-house, andando a catalogare in maniera sistematica i guasti che si verificano sui singoli componenti. Nell'ambito della sicurezza, invece, è possibile ottenere valutazioni quantitative attraverso metodi come la "Rete Bayesiana", ma anche in questo caso il metodo risulta limitato a causa dell'assenza di database ufficiali rilasciati da enti certificati (FAA, NTSB, EASA) che permettano di ottenere dati certi riguardo le probabilità di accadimento degli eventi incidentali. Al giorno d'oggi è possibile ottenere semplicemente delle informazioni parziali attraverso lo studio di lavori precedenti, l'analisi di forum online e la ricerca di report ufficiali inerenti alcuni eventi specifici, rendendo in questo modo il metodo difficile da testare e validare, ottenendo dei risultati solo teoricamente validi. Nel momento in cui tutta questa serie di dati sarà disponibile, lo studio dell'affidabilità e sicurezza dei sistemi UAV in ambito civile potrà effettuare un ulteriore passo in avanti, garantendo una maggior sicurezza per tutti i cittadini.

Acronimi

ABS Acrilnitrile Butadiene Stirene.

AIDS Accident and Incident Data System.

AMC Acceptable Means of Compliance.

AMI Aeronautica Militare Italiana.

ASW Antisubmarine Warfare.

BVLOS Beyond Visual Line Of Sight.

C-IED Counterimprovised Explosive Devices.

CASEVAC Casualty Evacuation.

COTS Commercial Off-The-Shelf.

DOA Design Organization Approval.

EASA European Union Aviation Safety Agency.

ENAC Ente Nazionale per l'Aviazione Civile.

ENAV Ex acronimo di "Ente Nazionale per l'Assistenza al Volo".

ESC Electronic Speed Controller.

FAA Federal Aviation Administration.

GPS Global positioning system.

HALE High Altitude Long Endurance.

ICAO International Civil Aviation Organization.

IEC International Electrotechnical Commission.
IMU Inertial Measurement Unit.
ISO International Organization for Standardization.
ISR Intelligence Surveillance Reconnaissance.
MALE Medium Altitude Long Endurance.
MART Mini Avion de Reconnaissance Telepilot.
MAV Micro Air Vehicle.
MTBF Mean Time Between Failure.
MTOM Maximum Take-Off Mass.
NATO North Atlantic Treaty Organization.
NTSB National Transportation Safety Board.
PLr required Performance Level.
PMU Power Management Unit.
RAMS Reliability, Availability, Maintainability, Safety.
rpm Revolutions per minute.
RPV Remotely Piloted Vehicle.
S.A.R Synthetic Aperture Radar.
SAPR Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto.
SAR Search and Rescue.
SORA Specific Operations Risk Assessment.
SRP/CS Safety-Related Parts of Control Systems.
UAS Unmanned Aerial System.
UAV UNmanned Aerial Vehicle.
VLOS Visual Line Of Sight.

Bibliografia

- [1] Multirotore venture le – lunga durata. <https://www.pros3.eu/venture-le-lunga-durata/>.
- [2] New mexico museum of space history. <https://www.nmspacemuseum.org/inductee/archibald-m-low/>.
- [3] Azza Allouch, Anis Koubaa, Mohamed Khalgui, and Tarek Abbas. Qualitative and quantitative risk analysis and safety assessment of unmanned aerial vehicles missions over the internet. *IEEE Access*, 7:53392–53410, 2019.
- [4] Christine M Belcastro, John V Foster, Richard L Newman, Loren Groff, Dennis A Crider, and David H Klyde. Aircraft loss of control: problem analysis for the development and validation of technology solutions. In *AIAA guidance, navigation, and control conference*, page 0092, 2016.
- [5] Louisa Brooke-Holland. Overview of military drones used by the uk armed forces. *House of Commons Library, Briefing Paper*, 6493, 2015.
- [6] Walter R Dornberger. The german v-2. *Technology and Culture*, 4(4):393–409, 1963.
- [7] Archibald E. Douglas. The captive kite-balloon. 1887.
- [8] Francis Enomoto, David Bushnell, Ewen Denney, Ganesh Pai, and Johann Schumann. *Preliminary recommendations for the collection, storage, and analysis of UAS safety data*. National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center, 2013.
- [9] Paul G Fahlstrom, Thomas J Gleason, and Mohammad H Sadraey. *Introduction to UAV systems*. John Wiley & Sons, 2022.
- [10] Anthony V Fernando. Survey of suas unintended flight termination as depicted in internet video. *Journal of unmanned vehicle systems*, 5(3):109–114, 2017.
- [11] International Organization for Standardization. *Safety of Machinery—General Principles for Design—Risk Assessment and Risk Reduction, (ISO 12100:2010)*. 2010.
- [12] International Organization for Standardization. *Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — Part 1: General principles for design, (ISO 13849-1:2015)*. 2015.

- [13] Jay Gundlach. *Designing unmanned aircraft systems: a comprehensive approach*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [14] Torben Jespen. *Risk Assessments and Safe Machinery: Ensuring Compliance with the EU Directives*. Springer, 2016.
- [15] Andrew F. Mazzara. Supporting arms in the storm. 1991.
- [16] Medicine National Academies of Sciences, Engineering et al. *Assessing the risks of integrating unmanned aircraft systems (UAS) into the national airspace system*. National Academies Press, 2018.
- [17] Peter Neff and Karl E Garman. Identifying and mitigating human factors errors in unmanned aircraft systems. In *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, page 3593, 2016.
- [18] The European Parliament. *Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on machinery, and amending Directive 95/16/EC (recast)*. 2006.
- [19] David Sanz, João Valente, Jaime del Cerro, Julián Colorado, and Antonio Barrientos. Safe operation of mini uavs: a review of regulation and best practices. *Advanced Robotics*, 29(19):1221–1233, 2015.
- [20] Kelley Saylor. A world of proliferated drones. *Center for a New American Security*, 2015.
- [21] Fred Schenkelberg. How reliable does a delivery drone have to be? In *2016 annual reliability and maintainability symposium (RAMS)*, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [22] Gary Schroeder. Nasa’s ingenuity mars helicopter: The first attempt at powered flight on another world. *American Scientist*, 108(6):330–331, 2020.
- [23] W. Wagner and W.P. Sloan. *Fireflies and Other UAVs (Unmanned Aerial Vehicles)*. Midland, 1992.
- [24] RA Walker and RA Clothier. Safety risk management of unmanned aircraft systems. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Springer, 2015.
- [25] Harrison G Wolf. *Drones: Safety risk management for the next evolution of flight*. Routledge, 2017.

Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento al Prof. Paolo Maggiore ed all'azienda "Pro S3" nella figura dell'Ing. Daniele Camatti grazie ai quali questo studio è stato possibile. La loro disponibilità e gentilezza mi ha permesso di approfondire un settore energetico ed in continua evoluzione come quello dei sistemi UAV, che spero molto presto possano esprimere a pieno le loro potenzialità nella vita di tutti i giorni.

Grazie di cuore a Valerio, Cosimo, Giovanni, Cash, Sandro, Mario, Paolo, Matteo, Angelo e Piero per essersi rivelati amici sinceri durante questo percorso. Il Covid ci ha tenuti lontani per troppo tempo ma i bei momenti passati in vostra compagnia resteranno sempre vividi nella memoria, colmi di sorrisi e spensieratezza.

Grazie agli amici della triennale, il folle gruppo "La Chiangiuta", divenuti ormai da tempo fratelli su cui poter contare sempre e comunque, soprattutto se si tratta di dover imbastire una bella grigliata a base di salsiccia e bombette.

Grazie a tutti gli amici del paese per essere sempre al mio fianco e condividere insieme molti aspetti preziosi della quotidianità, dalle mega riunioni di studio alle cene in pizzeria o in riva al mare con la leggerezza che ci contraddistingue.

Grazie a Giorgia, Ilaria e Simona, un pilastro per me importante fin dai tempi delle superiori, in grado di fornirmi il loro appoggio e sostegno, ora come allora.

Un ringraziamento speciale lo dedico a Matteo, il "bobmattley" di cui ognuno di noi ha bisogno. Spesso mi fermo a pensare quanto sia incredibile la capacità del mondo digitale di unire persone lontane. Ci siamo conosciuti per caso durante la partita di un gioco online e da quel momento sei diventato per me un punto di riferimento imprescindibile ed un amico di cui non potrei mai fare a meno.

Grazie per tutto quello che hai fatto per me in questi anni.

Il ringraziamento più importante, infine, lo devo alla mia famiglia. Grazie ai miei genitori e mia sorella per avermi sostenuto ogni giorno con pazienza. Mi avete sempre garantito la libertà di scegliere cosa fosse meglio per me in maniera autonoma, permettendomi così di costruire, un mattoncino dopo l'altro, la persona che sono divenuto al momento. Anche quando ho vacillato, siete stati un faro luminoso che mi ha indicato la giusta rotta da seguire per rientrare al porto e ve ne sono sinceramente grato. Grazie ai nonni ed a tutti i parenti per mostrarmi da sempre affetto ed interesse in quello che faccio, in quello che sono. Grazie.