



Gruppo di Lavoro “Velivoli Ipersonici”

Chairman: Gen. B.A. (r) Giuseppe Cornacchia, CESMA

Regolamentazione (WP 4)

Coordinatore: Ing. Giovanni Di Antonio, ENAC

**Aeronautica Militare (AM)/
Reparto Sperimentale di Volo/
Gruppo Ingegneria per l’Aero-Spazio:**

**Cap. G.A.r.n. F. Monaci
M.llo 1[^] cl. E. Del Grande, M&S S.M.E.
T.Col. G.A.r.n. F. Dolce, Ph.D.**

**Aeronautica Militare (AM)/
Corpo Sanitario Aeronautico:**

Col. CSA Francesco Torchia

ALTEC:

Ing. Francesco Santoro

**Ente Nazionale per l’Aviazione Civile
(ENAC):**

Ing. Giovanni Di Antonio



Indice

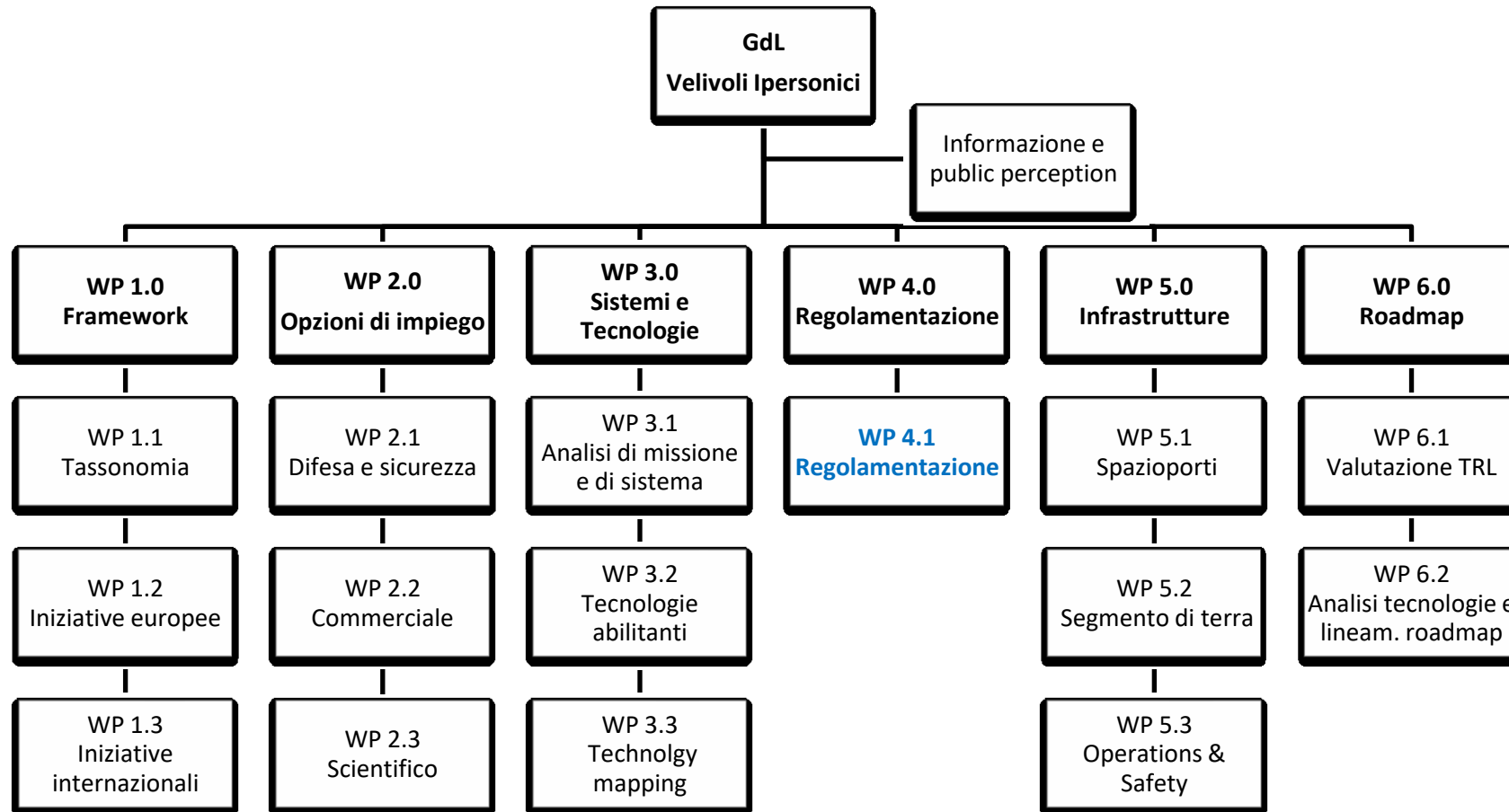
Work Breakdown Structure	4
Acronimi	5
1 Introduzione	7
1.1 Il rinnovato interesse per il volo spaziale commerciale	7
1.2 Il volo ipersonico nel contesto del sistema aerospaziale	8
1.3 Regolamentazione, tecnologie e politiche dei trasporti	9
1.4 Armonizzare il quadro regolamentare	9
2 Scenari operativi e aspettative commerciali	11
2.1 Volo suborbitale e volo ipersonico	11
2.2 Applicazioni commerciali	12
2.3 Volo punto-punto orbitale	15
2.4 Volo punto-punto ipersonico	15
3 Diritto aereo e diritto spaziale	16
3.1 Approccio spazialistico e approccio funzionalistico	16
3.2 Le convenzioni internazionali di diritto aereo	19
3.3 Verso un nuovo diritto uniforme per il trasporto spaziale commerciale?	21
4 Obiettivi di sicurezza	21
4.1 Il concetto di sicurezza	21
4.2 Definire gli obiettivi di sicurezza	22
4.3 Protezione delle infrastrutture critiche	26
5 La via italiana al volo spaziale commerciale	27
5.1 Le iniziative italiane in campo regolamentare	27
5.2 La <i>roadmap</i> regolamentare	28
5.3 Autorizzare i voli suborbitali sperimentali	30
6 Sostenere lo sviluppo in sicurezza	31
6.1 L’approccio basato sulla centralità delle operazioni	31
6.2 L’analisi globale dei rischi	33
6.3 Il modello <i>Bow-Tie</i>	34
6.4 La valutazione del rischio per le terze parti a terra	38



6.5	Il corridoio di volo.....	40
7	Le tecniche di modelling & simulation	42
7.1	A supporto della valutazione del rischio e della capacità di radar <i>tracking</i>	42
7.2	Cenni teorici	42
7.3	Attività di simulazione sviluppate mediante i <i>tool</i> di <i>modeling & simulation</i>	43
7.4	Simulazione di ricaduta dei <i>debris</i> associata a un volo suborbitale.....	43
7.5	Simulazione di dispositivi radar di <i>tracking</i> a supporto di un volo suborbitale.....	46
7.6	Le caratteristiche dei <i>tool</i> di <i>M&S</i> disponibili presso il RSV/GIAS dell’AM per potenziali future applicazioni.....	47
8	Spaziporti.....	50
8.1	Adeguamento degli attuali aeroporti o realizzazione di nuovi spaziporti?	50
8.2	Infrastrutture e logistica. Il problema dello stivaggio del combustibile.....	51
8.3	Requisiti ambientali.....	52
8.4	Piano di controllo del territorio come misura di mitigazione del rischio	53
8.5	Collocazione geografica e integrazione con la rete globale dei trasporti.....	54
8.6	L’utilizzo di strutture militari per voli civili	54
9	Problemi aeromedici del volo suborbitale	55
10	Aspetti da approfondire, soluzioni da individuare	59
11	Conclusioni	60
12	Riferimenti e bibliografia.....	61



Work Breakdown Structure





Acronimi

AMI	Aeronautica Militare Italiana
ANSV	Agenzia Nazionale per la Sicurezza del Volo
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management
CoE	Centre of Excellence
CS	Certification Specification
CSLA	US Commercial Space Launch Act
CST	Commercial Space Transportation
EASA	European Aviation Safety Agency
EC	European Commission
ENAC	Ente Nazionale per l'Aviazione Civile
ENAV	Società Nazionale di Assistenza al Volo
ESA	European Space Agency
ESD	Event Sequence Diagram
EU	European Union
FAA	Federal Aviation Administration
FAA-AST	FAA Office for Commercial Space Transportation
FAR	Federal Aviation Regulations
FOCA	Swiss Federal Office of Civil Aviation
GIAS	Gruppo Ingegneria per l'Aero-Spazio
HE	Hazardous Element
IAASS	International Association for the Advancement of Space Safety
ICAO	International Civil Aviation Authority
ICBM	Inter Continental Ballistic Missile
IIP	Instantaneous Impact Point
IM	Initiating Mechanism
ITAF	Italian Air Force (AMI)
ITAR	US International Traffic in Arms Regulations



ITB	Integrated Test Bed
JARUS	Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems
M&S	Modeling and Simulation
NASA	National Aviation and Space Agency
NEW	Net Explosive Weight
OEZ	Overflight Exclusion Zone
PEIS	Programmatic Environmental Impact Assessment
RLV	Reusable Launch Vehicle
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
RSV	Reparto Sperimentale Volo
SESAR	Single European Sky ATM Research
SMS	Safety Management System
SORA	Safety Operational Risk Assessment
TIP	Technical Implementation Procedures
UNOOSA	United Nations Office for Outer Space Affairs



1 Introduzione

1.1 Il rinnovato interesse per il volo spaziale commerciale

Sin dagli inizi dell'epoca spaziale ci si è resi conto che la messa in orbita di carichi paganti (*payload*) mediante lanciatori a razzo non riutilizzabili costituiva una modalità – sebbene obbligata – assolutamente poco efficiente che comportava – e comporta – elevatissimi costi per chilogrammo di carico pagante da mettere in orbita, considerati i bassissimi rapporti tra quest'ultimo e la massa non riutilizzabile del razzo data dalla massa del carburante consumato e dalla massa inerte strutturale dispersa nello spazio o fatta ricadere verso la Terra attraverso l'atmosfera. Questo genere di considerazioni, trainate dall'imperativo obiettivo dell'abbassamento dei costi, hanno portato negli anni settanta dello scorso secolo allo sviluppo e alla messa in servizio dello *Space Shuttle* che costituiva un sistema parzialmente riutilizzabile.

La ricerca relativa ai sistemi di lancio riutilizzabili (*RLV – Reusable Launch Vehicle*) è proseguita e negli ultimi anni alcune iniziative industriali, come quelle della *Virgin Galactic* negli Stati Uniti, hanno permesso di sviluppare veicoli completamente riutilizzabili per l'accesso allo spazio mediante voli suborbitali, fino a quote intorno ai 100 km di altezza dalla superficie terrestre (la così detta *Linea di Karman*), a scopo di turismo e, in prospettiva, per la messa in orbita di piccoli satelliti (*small satellites*). Questi veicoli raggiungono velocità ipersoniche per lo meno in alcune fasi di volo nell'atmosfera.

Parallelamente la ricerca, sia negli Stati Uniti sia in Europa, ha sviluppato gli aspetti legati alla propulsione *ramjet* e *scramjet* e agli aspetti strutturali, di aerodinamica, e meccanica del volo in fase di rientro orbitale (si veda ad esempio il recente programma IXV).

Gli sviluppi in corso negli Stati Uniti stanno facendo crescere in questi ultimi anni l'interesse in tutto il mondo per i voli suborbitali e molti paesi, pur privi di un contesto industriale e di ricerca autonomo, si stanno comunque muovendo per promuovere l'attività del volo suborbitale da spazioporti situati sul proprio territorio, vedendo in ciò notevoli opportunità di sviluppo economico. La statunitense FAA prevede che solo negli Stati Uniti, nei prossimi anni, si potrebbe arrivare ad effettuare un lancio spaziale commerciale al giorno.

A fronte soprattutto di tali iniziative commerciali, le autorità aeronautiche e spaziali dei Paesi più evoluti si stanno da tempo muovendo sia in ambito nazionale sia in ambito internazionale (a livello ICAO e UNOOSA) per promuovere lo sviluppo di un quadro legislativo e di norme in grado di consentire questo tipo di attività "aero-spaziale" garantendo innanzi tutto la sicurezza per le persone e le cose sorvolate a terra, consentendo e accompagnando lo sviluppo del settore in maniera ordinata, senza l'imposizione di appesantimenti regolatori non necessari.



Al momento gli standard di sicurezza relativi alla progettazione, alla costruzione e all'utilizzo dei velivoli per voli suborbitali ipersonici (useremo per essi il termine *spazioplano*) sono solo standard industriali non adottati o riconosciuti dagli Stati e dalle autorità aeronautiche, né la loro applicazione viene attentamente controllata e verificata come oggi si fa in ambito aeronautico. Questo fatto comporta che, oggi, uno spazioplano non può essere “certificato” da uno Stato come “sicuro” per gli occupanti a bordo, i quali per il momento si devono assumere coscientemente e consapevolmente – mediante la firma di un consenso informato – l'elevato rischio che tali operazioni comportano. Di contro una adeguata sicurezza per le terze parti a terra viene garantita mediante l'effettuazione di una attenta e completa analisi dei rischi e mediante la messa in atto di opportune misure di mitigazione volte a controllare questi rischi fino ad un livello stabilito ritenuto accettabile.

Nel futuro, quando il settore si sarà sviluppato, sarà maturato e il volo spaziale commerciale sarà diventato di routine, sarà necessario avere un *corpus* di norme completo, analogo a quello oggi esistente per l'aviazione civile, che possa coprire tutti gli aspetti del volo spaziale commerciale – dal progetto, alla produzione, alla manutenzione, alle operazioni, alle licenze, ai requisiti per le organizzazioni, etc. – e questo per garantire non soltanto la sicurezza delle terze parti a terra ma anche la sicurezza completa degli occupanti a bordo a livelli ritenuti adeguati ed accettabili dagli Stati.

1.2 Il volo ipersonico nel contesto del sistema aerospaziale

Il volo ipersonico suborbitale o trans-atmosferico, ad elevati numeri di Mach, potrà effettuarsi ed essere consentito solamente nel contesto di un più ampio e complesso *sistema aerospaziale*.

Parlare di volo ipersonico, in particolare dal punto di vista regolamentare, significa necessariamente tenere conto di tutti i fattori che rendono possibile l'effettuazione in sicurezza di questa tipologia di voli. Poiché l'obiettivo principale della regolazione è garantire alla società un adeguato livello di sicurezza (*safety*) nel contesto di un quadro di riferimento legale e normativo certo, che consenta al settore di svilupparsi in maniera ordinata e flessibile, è chiaro come nel regolare il settore occorra tenere in considerazione tutti i fattori e gli elementi del sistema che concorrono a garantire l'ottenimento e il successivo mantenimento di questi livelli di sicurezza. Trascurare anche solo uno degli anelli di questa catena porterebbe, infatti, ad un detrimento dei livelli accettati di sicurezza e, quindi, ad un aumento del rischio non tollerabile dalla società.

Per questo motivo, dal punto di vista regolamentare sarebbe preferibile riferirsi alle *operazioni* che comprendono fasi di volo ipersonico, come ad esempio le operazioni suborbitali, piuttosto che riferirsi ad al volo ipersonico in sé.

Tra gli elementi principali di un *sistema aerospaziale* rientrano:

- (i) il veicolo ipersonico (ad esempio lo spazioplano) in termini di progettazione, produzione, manutenzione, svolgimento delle operazioni;



- (ii) (ii) lo spaziorporto;
- (iii) (iii) le licenze dell'equipaggio e i requisiti medici;
- (iv) (iv) le organizzazioni di progetto, di produzione, di manutenzione, di svolgimento delle operazioni, di gestione dello spaziorporto, di addestramento;
- (v) (v) i requisiti di addestramento;
- (vi) (vi) la gestione dello spazio aereo;
- (vii) (vii) gli aspetti di *security*; etc.

Ad ognuno di questi aspetti dovranno essere dedicati opportuni approfondimenti.

1.3 Regolamentazione, tecnologie e politiche dei trasporti

Appare a tutti necessario sviluppare in parallelo le tecnologie, il quadro regolamentare e le politiche dei trasporti; a tale proposito sarebbe auspicabile che gli obiettivi strategici del Paese fossero fatti propri o, ancor meglio, fossero direttamente generati e imposti dal livello politico-istituzionale (Governo e Parlamento) come avviene in molti Paesi (si veda ad esempio il caso del Regno Unito o degli USA dove i rispettivi parlamenti e governi hanno fornito linee guida e - nel caso degli USA - una legislazione completa in materia di volo spaziale commerciale).

Come anche sottolineato alla 19ma Conferenza annuale della FAA sul trasporto Spaziale Commerciale, tenutasi a Washington (DC) nel febbraio 2016, la regolazione è usualmente spinta da esigenze di mercato. Tuttavia se da un lato risulta chiaro che non bisogna regolare troppo presto il settore perché, in assenza di una maturità tecnologica e di una esperienza di servizio adeguate, si andrebbero ad imporre dei vincoli troppo stringenti o inutili, dall'altro lato appare anche chiaro come non bisogna regolare troppo tardi perché in tal caso non si fornirebbe il necessario quadro regolamentare che consenta, nell'ottica di una *fair competition*, uno sviluppo ordinato del settore sulla base di regole certe uguali per tutti, come chiaramente auspicato dal mondo industriale alle autorità regolatrici.

Dal punto di vista prettamente tecnico-regolamentare una approfondita conoscenza delle tecnologie coinvolte e, soprattutto, dei rischi che da queste possono derivare (si pensi ad esempio al problema dell'affidabilità del sistema propulsivo o dei sistemi di supporto alla vita umana – *life support*) consente di definire correttamente gli standard di progetto atti a garantire i livelli di sicurezza stabiliti e ad effettuare con un più alto livello di confidenza l'analisi dei rischi.

1.4 Armonizzare il quadro regolamentare

Nel medio-lungo periodo la regolamentazione delle attività spaziali, suborbitali e ipersoniche, quantomeno a scopo commerciale, sarà molto probabilmente presa in carico dagli organismi sovranazionali che oggi presiedono al governo dell'aviazione civile e delle attività spaziali, ovvero, per quanto attiene all'Italia, l'Unione Europea attraverso le proprie agenzie (EASA ed ESA) e le Nazioni Unite mediante l'ICAO e l'UNOOSA. Tuttavia nel



corto-medio periodo gli organismi internazionali appaiono meno attivi lasciando che ogni Stato si organizzi e si autoregoli come ritiene più opportuno, secondo le proprie esigenze nazionali, accumulando ricerca, normativa ed esperienza operativa che poi saranno prese in conto dagli stessi organismi internazionali come base per creare una legislazione e una normativa uniformi.

A livello internazionale, mentre l'Unione Europea, tramite l'EASA, non sembra al momento impegnata nello sforzo di accomodare od integrare i voli suborbitali nell'attuale contesto della regolazione dell'aviazione civile (nonostante l'ESA sia impegnata in alcuni importanti programmi riconducibili al volo ipersonico di rientro dall'orbita, come il programma IXV) a livello delle Nazioni Unite è stato istituito sotto gli auspici dell'ICAO e dell'UNOOSA, il gruppo di lavoro denominato *Space Learning Group* che ha lo scopo di raccogliere e analizzare tutta la normativa prodotta dai vari Stati, relativa al settore dei voli spaziali commerciali, per una futura armonizzazione e integrazione nell'ambito dell'aviazione civile internazionale. Una parte rilevante del lavoro dello *Space Learning Group* sarà quello di analizzare i rischi che questo nuovo settore di attività pone all'aviazione civile.

Sulla base di questo scenario è importante sviluppare una normativa nazionale con un occhio rivolto allo scenario internazionale e con un grado di flessibilità tale da consentirle rapidamente di confluire nella futura regolamentazione internazionale in maniera naturale, senza traumi per i soggetti industriali che nel frattempo avessero iniziato ad operare in ambito nazionale. E' importante quindi poter iniziare l'attività di regolazione il più presto possibile, a partire da un ambito specifico e delimitato come quello delle operazioni sperimentali, proprio al fine di poter accumulare rapidamente quell'esperienza di servizio necessaria per poter successivamente allargare l'ambito di applicazione del quadro regolamentare e permettere l'ulteriore sviluppo del settore. Il primo passo della *road map* regolamentare che più oltre si descriverà è quindi proprio quello di sostenere e permettere lo svolgimento di operazioni sperimentali relative al volo suborbitale e ipersonico dal territorio nazionale. Per fare ciò sarà poi necessario individuare un idoneo sito delle operazioni (spaziporto) da cui effettuare inizialmente il lancio e il rientro dello spaziotano.

Individuare le modalità per poter autorizzare il volo suborbitale e ipersonico di uno spaziotano da una parte e individuare e autorizzare un idoneo spaziotano dall'altra, costituiscono dunque i due pilastri regolamentari che consentiranno l'avvio delle attività spaziali commerciali in Italia. Su questi due elementi si sta quindi concentrando lo sforzo iniziale dell'ENAC (in qualità di Autorità unica dell'aviazione civile in Italia, come stabilito dall'art. 687 del Codice della Navigazione) per costruire un quadro regolamentare nazionale sul volo suborbitale.



2 Scenari operativi e aspettative commerciali

Allo scopo di definire gli scenari operativi su cui costruire od adattare un quadro regolamentare per il volo suborbitale e ipersonico è necessario partire dalla definizione di volo suborbitale e ipersonico, di spaziplano e di spazioporto. Tali definizioni hanno importanti risvolti legali per quanto riguarda l'applicazione del diritto aereo (*air law*) o del diritto spaziale (*space law*) che saranno affrontate nel successivo Paragrafo 3; qui interessa fornire delle definizioni dal punto di vista tecnico che aiutino a comprendere meglio gli scenari operativi da regolare.

2.1 Volo suborbitale e volo ipersonico

In termini generali un volo suborbitale è un volo nel quale il veicolo non percorre (o non è in grado di percorrere) alcun tratto di un'orbita intorno alla Terra (ovvero non intersecante la superficie terrestre). Se il veicolo percorresse, nella sua traiettoria, anche solo un tratto di orbita che non interseca mai la superficie terrestre allora il volo sarebbe un volo orbitale. Più precisamente, seguendo la FAA possiamo dare le seguenti definizioni:

– ***Traiettoria suborbitale e Punto Istantaneo di Impatto***

*Una traiettoria suborbitale è una traiettoria intenzionale di un veicolo (o di una sua parte) tale che qualora in ogni punto di essa si interrompesse la propulsione il veicolo (o la sua parte) percorrerebbe, a partire da quel punto, una traiettoria nel vuoto (ovvero assumendo l'assenza totale di atmosfera) che intersecherebbe la superficie terrestre. Il corrispondente punto di impatto a terra del veicolo (o della sua parte) associato al punto della traiettoria nominale in cui si è assunta l'interruzione di propulsione, si dice *punto istantaneo di impatto nel vuoto* (*Vacuum-IIP*, *Vacuum Instantaneous Impact Point* o, più brevemente *IIP*, *Instantaneous Impact Point*).*

– ***Veicolo Suborbitale (o Spaziplano)***

Un veicolo suborbitale ("Suborbital Vehicle" o anche "Suborbital Rocket") è un veicolo dotato di propulsione a razzo (eventualmente anche ibrida, ovvero un endoreattore insieme ad altre tipologie di propulsione come motore a getto o statoreattore) specificamente progettato per volare in una traiettoria suborbitale e tale che la sua spinta sia maggiore della sua portanza per la maggior parte della fase di ascesa propulsa con motore a razzo.

Nel prosieguo con il termine *spaziplano* intenderemo sempre un veicolo suborbitale. Occorre notare, a questo punto, che la definizione di spaziplano data sopra presume alcune



ipotesi progettuali fondamentali, in grado di discriminare in prima battuta uno spaziplano da un altro tipo di veicolo:

- 1) uno spaziplano deve avere una propulsione a razzo;
- 2) uno spaziplano, in linea di principio, è dotato di superfici aerodinamiche che permettono lo sviluppo di una portanza.

Quest'ultimo aspetto della definizione di spaziplano riveste una importanza particolare ai fini della individuazione del quadro legale e del regime di diritto da applicare ai voli suborbitali: potendo sviluppare una portanza e, quindi, un sostentamento dell'aria attraverso l'atmosfera, uno spaziplano potrebbe essere assimilato, in linea di principio, ad un aeromobile in base alla definizione fornita dall'ICAO [1] (*Aircraft. Any machine that can derive support in the atmosphere from the reaction of the air*).

Per uno spaziplano vi possono essere svariate soluzioni progettuali che non escludono, dal punto di vista della propulsione, una stadiazione ibrida che preveda, ad esempio, un primo stadio a decollo orizzontale con un velivolo convenzionale turbogetto, da cui viene lanciato in quota un secondo stadio propulso a razzo che raggiunge la Linea di Karman. Le configurazioni e la tipologia di operazioni possono essere molteplici e non convenzionali e richiederanno quindi necessariamente un significativo tasso di innovazione anche dal punto di vista regolamentare.

Un veicolo suborbitale può essere considerato un caso particolare di veicolo di lancio e di rientro riutilizzabile (RLV - Reusable Launch Vehicle), terminologia che comprende i veicoli di lancio e di rientro utilizzati nelle operazioni spaziali orbitali, che in questa sede non si considerano.

Sebbene un volo che rispetti le suddette definizioni sia considerato *suborbitale* occorre porre bene attenzione al fatto che nella fase non propulsa del volo (di *coasting*) ad alta quota, al culmine della sua traiettoria, quando sono spenti i motori a razzo, il veicolo percorre comunque, in realtà, *un'orbita ellittica* nell'intorno del suo apogeo. Tale orbita interseca la superficie terrestre come farebbe quella tipica di un missile balistico intercontinentale (ICBM).

A causa delle elevate velocità raggiungibili in un volo suborbitale, soprattutto in fase di rientro, ma in linea di principio anche in fase di lancio, il veicolo attraversa dei regimi aerodinamici di volo ipersonico ad elevato numero di Mach (superiore a 4 o 5): il regime ipersonico deve quindi essere preso in considerazione come una delle possibili fasi che caratterizzano un volo suborbitale.

2.2 Applicazioni commerciali

Sebbene le prime attività di volo suborbitale sul territorio italiano saranno probabilmente a carattere sperimentale e senza occupanti a bordo oltre all'equipaggio, tali attività inizieranno



e si svilupperanno solo a fronte di motivazioni commerciali. Di seguito si riportano alcuni utilizzi commerciali dei voli suborbitali:

- Turismo spaziale;
- Messa in orbita di piccoli satelliti (*Small Satellites*);
- Trasporto *business* di persone punto-punto;
- Trasporto commerciale punto-punto su larga scala (Figura 2-1);
- Trasporto merci;
- Ricerca (ad esempio in microgravità).

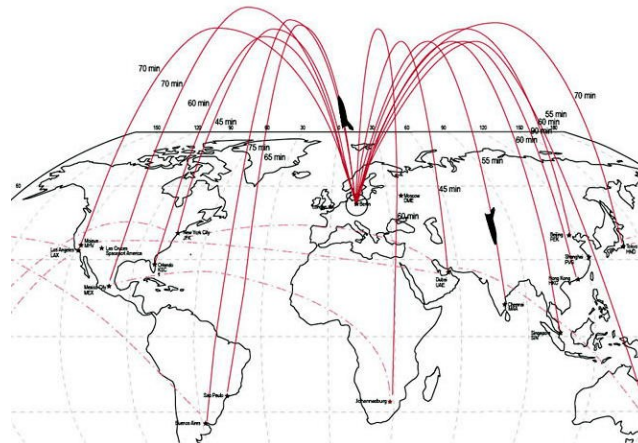


Figura 2-1. Collegamenti punto-punto su larga scala mediante voli suborbitali. Figura tratta da [3]

Il tipico volo suborbitale per turismo spaziale prevede ad oggi un volo della durata di meno di un'ora con lancio/decollo e rientro/atterraggio da uno stesso spaziorporto e con il raggiungimento di una quota massima di circa 100 km (o poco oltre) percorrendo, dopo la fase propulsa di lancio, una traiettoria balistica in orbita ellittica, per un breve periodo di tempo (tipicamente qualche minuto), nell'intorno dell'apogeo, per poi effettuare il rientro planato o propulso in atmosfera fino a terra. Il tutto allo scopo di offrire agli occupanti l'esperienza di "assenza di peso" e di vista della Terra da una prospettiva "spaziale".

Oltre alle attività legate al settore del turismo spaziale, che è quello attualmente più sviluppato [2], i maggiori operatori, ad iniziare dalla *Virgin Galactic*, intravedono le maggiori prospettive di *business* nel settore della messa in orbita di piccoli satelliti la cui domanda, si prevede, crescerà esponenzialmente nei prossimi anni e dove si prevede un abbassamento dei costi per la messa in orbita di almeno un fattore 10.

Per quanto riguarda il trasporto punto-punto di persone, mentre la prospettiva del trasporto intercontinentale rimane ancora lontana, sia per problemi tecnici che regolamentari, viene



vista invece come più possibile e vicina l'applicazione del volo suborbitale al trasporto punto-punto per clientela *business*, sebbene anche questo utilizzo presenti alcune difficoltà pratiche, messe in evidenza in [3], qualora si voglia utilizzare per questo tipo di operazioni uno spaziplano derivato dai modelli attualmente utilizzati per il turismo spaziale. Si parla in tal caso di *stretched suborbital flight*. Modificare e adattare gli attuali spazioporti per il turismo spaziale per l'effettuazione di voli suborbitali punto-punto su un *range* apprezzabile significherebbe dotare lo spaziplano di un motore di apogeo che sia in grado di ruotare il semiasse dell'orbita ellittica all'apogeo in modo da spostare il punto di intersezione dell'orbita con la superficie terrestre di una quantità angolare corrispondente al *range* voluto. Tale soluzione tuttavia, al di là dei problemi tecnici legati alla complicazione della configurazione dello spaziplano (che ha poi delle conseguenze a livello di analisi del rischio, dovendo tenere conto di possibili malfunzionamenti o avarie aggiuntivi) si scontra con la limitazione oggettiva in base alla quale l'azionamento del motore di apogeo può essere effettuato per un periodo di tempo limitato (di pochi minuti) prima che lo spaziplano rientri negli strati più densi dell'atmosfera; il che limita di fatto l'angolo massimo di rotazione del semiasse maggiore dell'orbita ellittica e, quindi, il massimo *range* ottenibile a terra. Utilizzando questa tecnica in [3] si è stimato che il massimo *range* ottenibile con un volo suborbitale avente una quota massima di 100 km, con una fase di volo balistico di 6 minuti e una velocità a Mach 3, può essere al massimo di 200 miglia. Oltre a questo occorrerebbe poi avere una rete adeguata di spazioporti con distanze reciproche adatte e con la possibilità di operare spesso, con poche limitazioni, per venire incontro alle esigenze di mobilità della clientela *business*, la quale deve poter infine raggiungere lo spazioporto con facilità e in tempi brevi a partire dai grandi centri abitati.

Una soluzione a questo tipo di problematiche consisterebbe nel progettare degli spazioporti che possano arrivare ben oltre la Linea di Karman dei 100 km di quota in modo da poter percorrere un'ampia orbita ellittica al pari di quanto fanno i missili balistici intercontinentali (ICBM). In tal modo pur di aumentare sufficientemente l'apogeo si ottiene un *range* sufficientemente grande da poter consentire dei voli suborbitali punto-punto intercontinentali.

In tal caso però le problematiche tecniche da superare sarebbero notevoli; si avrebbero infatti:

- maggiori velocità e quindi maggiori livelli di riscaldamento termico con la necessità di un più accurato e complesso dimensionamento strutturale;
- un *life support* più complesso;
- possibile interazione con satelliti in orbita;
- problemi legali più complessi legati al fatto che un tale veicolo dovrebbe essere considerato per la maggior parte del suo volo un oggetto spaziale (*space object*) soggetto al diritto spaziale, piuttosto che un aeromobile soggetto al diritto aereo.



Una ulteriore soluzione tecnica che consentirebbe l'utilizzo di voli suborbitali punto-punto a quote non troppo elevate su lunghe distanze sarebbe poi l'utilizzo della tecnica dello *skip reentry* che consente durante il rientro di percorrere diverse orbite ellittiche in fase balistica (lobi) sfruttando opportunamente le interazioni aerodinamiche negli strati bassi dell'atmosfera, purché l'energia totale iniziale al momento dell'inizio della fase di rientro sia sufficientemente grande da tenere conto delle perdite energetiche [4]. L'utilizzo di più lobi consentirebbe un aumento del *range* (Figura 2-2).

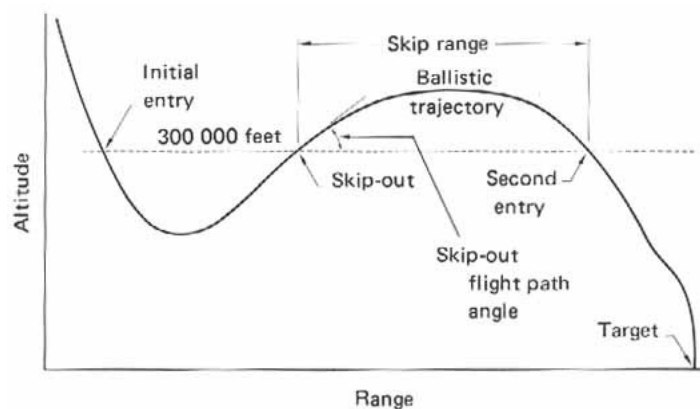


Figura 2-2. Manovra di *skip reentry*. Figura tratta da [4]

2.3 Volo punto-punto orbitale

Questo tipo di voli *orbitali* sarebbe ideale per coprire lunghe distanze in brevissimo tempo. Un volo punto-punto orbitale consisterebbe nell'entrare, anche se per un solo tratto, in un'orbita vera e propria intorno alla Terra (ovvero non intersecante la superficie terrestre). Le problematiche sarebbero simili a quelle descritte per il volo suborbitale di tipo ICBM. Tale tipo di operazioni esula, tuttavia, dagli scopi di questo lavoro.

2.4 Volo punto-punto ipersonico

L'alternativa al volo punto-punto suborbitale o orbitale è ovviamente costituita da velivoli ipersonici che volano costantemente all'interno dell'atmosfera. Questo tipo di velivoli ipersonici rientrano a tutti gli effetti nella definizione di aeromobile, pur essendo caratterizzati da marcate specificità che li differenziano nettamente rispetto agli aeromobili tradizionali subsonici (si pensi, nel caso del volo supersonico, al *Concorde*); a tale riguardo in [3] possiamo leggere:

"To perform an intercontinental point-to-point trajectory, a vehicle must be designed that can both attain the speeds necessary, and manage the thermal environment of transiting the atmosphere both during takeoff and landing. Such a vehicle is generally described as a



hypersonic vehicle, and it needs to have engines, thermal control systems, and stability control systems that are considerably more advanced than those needed for sub-orbital lobes."

Questi velivoli ricadrebbero nell'ambito dell'aviazione civile tradizionale (analogamente al *Concorde*) e ci sarebbero quindi pochi dubbi su quale sia il regime legale e il quadro normativo da applicare in questo caso: *air law*.

3 Diritto aereo e diritto spaziale

Il primo problema che si incontra nel definire il quadro normativo per le attività spaziali commerciali e per i voli suborbitali in particolare, è capire quale sia il quadro legale entro cui muoversi: ovvero il diritto aereo (*air law*) oppure il diritto spaziale (*space law*)¹.

Le possibilità sono molteplici, infatti una certa operazione, in funzione delle sue caratteristiche e della configurazione dello spaziolano, potrebbe essere interpretata come un volo soggetto al diritto aereo (ad esempio qualora si svolga chiaramente all'interno dell'atmosfera, nello spazio aereo tradizionalmente controllato), oppure come un volo tipicamente soggetto al diritto spaziale (come la messa in orbita di un satellite mediante un razzo) oppure ancora potrebbe essere assoggettato ad un regime misto in cui alcune fasi potrebbero essere soggette al diritto aereo ed altre al diritto spaziale. Una ulteriore possibilità – da alcuni caldeggiata – è la creazione di una nuova tipologia di diritto uniforme che possa autonomamente normare a livello internazionale il settore del trasporto spaziale commerciale.

E' chiaro che una discriminine fondamentale per discernere quale sia il quadro legale più adatto ad una operazione di volo suborbitale è la definizione di spaziolano come aeromobile oppure come oggetto spaziale e quella collegata di spazio aereo atmosferico e spazio profondo (*outer space*), distinzione quest'ultima non definita a livello di trattati internazionali, sebbene continuamente molto dibattuta.

3.1 Approccio spazialistico e approccio funzionalistico

Il problema della definizione delle operazioni spaziali commerciali come ricadenti nell'ambito del diritto aereo o del diritto spaziale è spesso affrontato mediante due approcci distinti, l'approccio spazialistico e quello funzionalistico.

- ¹ Esistono al momento cinque trattati internazionali che regolano le attività spaziali:
- (i) Agreement Governing the Activities of States on the Moon and Other Celestial Bodies, 1967 ("Moon Agreement"); (ii) Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies ("Outer Space Treaty"); (iii) Agreement on the Rescue of Astronauts, the Return of Astronauts and the Return of Objects Launched into Outer Space, 1968 ("Rescue Agreement"); (iv) Convention on International Liability for Damage Caused by Space Objects ("Liability Convention"); (v) Convention on Registration of Objects Launched into Outer Space ("Registration Convention").



In base all'*approccio spazialistico* il criterio per determinare l'applicabilità del diritto aereo rispetto a quello spaziale sarebbe la delimitazione fisica dello spazio aereo: al disotto di tale delimitazione ogni tipo di operazione sarebbe soggetta al diritto aereo mentre al disopra al diritto spaziale. Purtroppo una tale demarcazione non esiste sia dal punto di vista fisico, non esistendo un confine definito dell'atmosfera terrestre, sia da un punto di vista legale, non essendo questo limite definito in alcun trattato. Pertanto l'approccio spazialistico è di difficile applicazione².

In base all'*approccio funzionalistico* il tipo di operazioni svolto determina il tipo di regime legale cui tali operazioni devono essere soggette. A tale riguardo, per i voli suborbitali, in [5] è suggerito che:

“Flights which merely transit through (sub) orbital space during an earth-to-earth transportation would be in airspace and therefore should remain subject to air law.”

In effetti, gli spaziplani si comportano di fatto come aeromobili mentre volano all'interno dell'atmosfera bassa e come oggetti spaziali nell'intorno della Linea di Karman, per cui potrebbe essere preso in considerazione un *regime misto* in cui lo spaziplano sia soggetto al diritto aereo durante le fasi di volo atmosferiche, dove la responsabilità sarebbe principalmente in capo all'operatore, e potrebbe essere soggetto al diritto spaziale per le fasi di volo balistiche ad alta quota dove la responsabilità principale sarebbe dello Stato, in conformità all'*Outer Space Treaty*, anche se questa soluzione non sarebbe priva di problemi relativamente alla sua applicazione pratica.

L'interpretazione prevalente qui proposta, per il momento, è tuttavia quella di *considerare lo spaziplano come un aeromobile sulla base di un approccio sostanzialmente funzionalistico*. Se nella prima fase dei voli sperimentali tale interpretazione non sembra offrire difficoltà, potendo inquadrare tali voli nell'ambito della normativa nazionale (cfr. oltre), nel caso in cui si dovessero accogliere a bordo dei partecipanti diversi dall'equipaggio l'impostazione basata sui voli sperimentali sarebbe più difficile da sviluppare e necessiterebbe probabilmente di specifici adattamenti del quadro regolamentare nazionale per consentire la partecipazione di occupanti non appartenenti all'equipaggio a delle attività sperimentali.

Sulla base di questo presupposto, la *draft policy* ENAC sul trasporto commerciale spaziale in Italia [6] delinea le principali problematiche da affrontare e propone alcune linee guida da seguire:

“In the EU, safety aviation rules are prepared by EASA and issued by the EU Institutions (Parliament – Council - Commission) in the form of regulations covering aeronautical product certification, continuing airworthiness, personnel licensing, aircraft operations, aerodrome and airspace/air navigation. Within this framework, since spaceplanes used for

² Una possibile definizione tecnica del limite superiore dell'atmosfera terrestre potrebbe basarsi sulla definizione di una quota limite al disotto della quale risiede la maggior parte della massa atmosferica, ad esempio il 98%.



spaceflight experience would be providing air transport, they would be expected to comply with the standards for air commercial transport which are generally more demanding than those for general aviation or light aircraft.

However, due to present technology limits and stage of development of programs, spaceplanes cannot yet achieve the same safety standards as commercial aviation (e.g.: catastrophic failure rate better than 10^{-7} for flight hour). By requesting the same standards it would imply that no operations could take place.

A further option derives from the possibility for spaceplane operations to be exempted from EASA regulation. As a matter of the fact, although EU has legal competence, it has not exercised that competence so far because no regulation specifically applicable to spaceplanes has been issued, yet. In this framework, and similarly to aircraft, personnel and operations excluded from applicability of EASA Basic Regulations (ref. Reg. (EC) No 216/2008, Annex II (b) “aircraft specifically designed or modified for research, experimental or scientific purposes, and likely to be produced in very limited numbers”), Member States may consider to be entitled to regulate spaceplane operations nationally.

In other words, in the transition period until EU would issue specific regulations for spaceplanes and their operations, Member States might classify spaceplanes as experimental aircraft and therefore apply national standards.

In the framework of current Italian national aviation regulation, experimental aircraft are not allowed to conduct public transport operations; however exemptions might be granted that, subject to specific conditions and limitations, could permit sub-orbital spaceplanes flight experience for paying participants and cargo.”

Il nuovo quadro regolamentare italiano dovrebbe essere costruito inizialmente secondo i seguenti criteri:

- 1) Le operazioni non dovrebbero sottoporre le terze parti al suolo e le proprietà a dei livelli di rischio più elevati di quelli posti dalle attuali operazioni dell'aviazione civile.
- 2) Attualmente le operazioni suborbitali sono inerentemente rischiose in quanto sia le tecnologie sia le procedure operative sono ancora in una fase di sviluppo e non hanno raggiunto un livello di affidabilità paragonabile a quello dell'aviazione civile; pertanto sia l'equipaggio sia gli eventuali partecipanti non appartenenti all'equipaggio dovranno



essere ben consapevoli del livello di rischio che volontariamente affrontano e dovranno firmare un apposito *consenso informato*.

- 3) Il consenso informato tuttavia non dovrebbe esonerare l'operatore dalle proprie responsabilità finanziarie legate agli eventuali danni fisici e materiali subiti dall'equipaggio, dai partecipanti e dalle terze parti a terra incluse proprietà private e infrastrutture dello Stato. Pertanto l'operatore dovrà in ogni caso adottare delle procedure atte a minimizzare il rischio garantendo il più possibile la sicurezza degli occupanti oltre che delle terze parti a terra.
- 4) Gli obiettivi di sicurezza per le terze parti a terra e, in prospettiva, per gli occupanti, dovranno essere definiti e riconosciuti formalmente dalle previsioni regolamentari al fine di poter effettuare una analisi del rischio quantitativa ed eventualmente definire dei *safety target* che definiscano il livello di affidabilità minimo richiesto ai sistemi dello spaziolano. A questo argomento è dedicato il successivo Paragrafo 4.
- 5) Nel breve periodo gli operatori che saranno pronti ad effettuare operazioni suborbitali in Italia saranno probabilmente degli operatori statunitensi in possesso di licenze o permessi di volo rilasciati dalla FAA-AST sulla base della regolamentazione USA. Al fine di consentire a questi operatori di volare in Italia sarà quindi importante cercare di costruire un quadro regolamentare che rispecchi il più possibile (e per quanto possibile) il quadro regolamentare statunitense in modo da poter facilmente riconoscere e validare le licenze ed i permessi di volo rilasciati negli Stati Uniti.
- 6) In una seconda fase dovrebbe essere costruito un quadro regolamentare *risk-based* che consenta la modulazione dei requisiti sulla base del livello di rischio effettivamente posto dalle specifiche operazioni; contemporaneamente dovrebbe essere adeguatamente garantita la sicurezza degli occupanti. Dovrebbe infine essere garantito un adeguato livello di flessibilità per facilitare la successiva transizione della regolamentazione nazionale verso un probabile futuro quadro regolamentare europeo sviluppato dall'Unione Europea e dall'EASA.

3.2 Le convenzioni internazionali di diritto aereo

Una volta appurata la possibilità di considerare, almeno in una prima fase, lo spaziolano come un aeromobile e quindi soggetto, in linea di principio, al diritto aereo, occorrerà prendere in considerazione i trattati internazionali di diritto aereo per analizzare quali siano



applicabili, in quale misura e con quali possibili adattamenti da apportare al quadro giuridico nazionale. Tale analisi, iniziata dal Gruppo di Lavoro sui Voli Suborbitali è, al momento, solo agli inizi; basterà qui di seguito ricordare quali sono i trattati internazionali di diritto aereo da tenere presenti, oltre ovviamente ai Regolamenti Europei di riferimento, come il Regolamento Basico 2016/2008 [7].

- *Convenzione di Chicago* del 7 dicembre 1944 sull'aviazione civile internazionale e suoi annessi;
- *Convenzione di Varsavia* sul trasporto aereo internazionale del 12 ottobre 1929 e protocolli modificativi (ultimo Guatemala 1971 sui limiti di risarcimento dei danni);
- *Convenzione di Montreal* del 28 maggio 1999 (entrata in vigore in Italia il 28 giugno 2004).

Per quanto riguarda la disciplina dei danni a terzi per le attività aeronautiche (adottate dall'Assemblea ICAO a Montreal aprile-maggio 2009) le convenzioni applicabili di diritto uniforme, che sostituiscono la Convenzione di Roma del 1952, sono invece [7]:

- *Convenzione sulla Compensazione dei danni causati da aerei a terze parti (General Risks Convention)* che stabilisce i limiti della responsabilità dell'operatore, i casi di esonero; centralizza la domanda e stabilisce il riconoscimento automatico delle sentenze;
- *Convenzione sulla Compensazione per danni a terze parti risultanti da atti di illecita interferenza (The Unlawful Interference Convention)* che stabilisce un meccanismo di compensazione supplementare per i danni oltre i limiti di responsabilità contenuti nella Convenzione.

Tali convenzioni, o almeno i principi in esse riportati, potrebbero essere applicate anche ai voli suborbitali, con opportune modifiche; in particolare nel caso in cui venissero trasportati all'interno di spaziplani degli occupanti non appartenenti all'equipaggio (*spaceflight participants*). Tali passeggeri potrebbero essere tutelati dalla Convenzione di Varsavia e dalla Convenzione di Montreal. A tale riguardo in [7] è suggerito che il *Fondo Internazionale di Compensazione* per l'aviazione civile, che interviene per coprire la responsabilità degli operatori in caso di danni provocati da illecita interferenza, oltre i limiti della loro responsabilità eventualmente assicurata, possa coprire anche i danni provocati da spaziplani.



3.3 Verso un nuovo diritto uniforme per il trasporto spaziale commerciale?

In base al diritto aereo regolato dalla Convenzione di Chicago, gli Stati contraenti hanno la piena sovranità dello spazio aereo al disopra del proprio territorio e la responsabilità per danni è in carico all'operatore; mentre in base al diritto spaziale (*Outer Space Treaty*) gli Stati non hanno sovranità sullo spazio profondo ma mantengono una responsabilità diretta per i danni causati dai propri oggetti spaziali a terzi.

Come si vede, per certi aspetti, sembra che la situazione sia esattamente speculare e difficilmente conciliabile. Questo ed altri motivi di opportunità inducono alcuni a ritenere che la via migliore per risolvere il problema e definire un quadro regolamentare efficace per il volo spaziale commerciale sia quello di fondare un nuovo diritto uniforme che superi gli attuali quadri del diritto aereo e del diritto spaziale. Se pure certamente auspicabile, tuttavia non può essere questa la via per arrivare a consentire nel breve-medio termine i voli suborbitali dal territorio nazionale in quanto i tempi della eventuale definizione di un nuovo diritto uniforme sarebbero assai lunghi. Per tale motivo un approccio regolamentare incrementale, per passi successivi, sembra al momento il più efficace in una prima fase.

Il problema di fondare un nuovo diritto uniforme per il trasporto commerciale spaziale si pone tuttavia a livello delle Nazioni Unite (ICAO ed UNOOSA). La prima domanda cui dover rispondere è se poter integrare il volo suborbitale e ipersonico nell'attuale quadro normativo oppure modificare il quadro o crearne uno *ad hoc*. In sostanza si tratterà di individuare nuovi strumenti legali e normativi in un processo di costruzione che parta dal basso ovvero dalle esigenze immediate degli operatori e del mercato e dalle reazioni dei vari Stati. Il tutto dovrà poi convergere in uno sforzo di armonizzazione a livello internazionale: di certo un fitto programma di lavoro ed un impegnativo banco di prova per le Agenzie regolatrici dell'aviazione civile e dello spazio nei prossimi anni.

4 Obiettivi di sicurezza

4.1 Il concetto di sicurezza

Il concetto di sicurezza non è un concetto assoluto ma è un concetto relativo legato al livello di rischio che la società – o un individuo – ritiene accettabile e che si è quindi disposti a correre. La sicurezza deve essere intesa quindi come un *livello di rischio accettabile*.

Come noto il rischio (R) associato ad un evento "non voluto" è espresso quantitativamente dal prodotto della probabilità di accadimento di tale evento (P) per le conseguenze (C) che si avrebbero nel caso in cui l'evento si verificasse:

$$R = P \cdot C$$



Il rischio è dunque, in termini di calcolo delle probabilità, il valore atteso (o valore medio) del numero aleatorio dato dalle conseguenze C dell'evento. Ad esempio, le conseguenze C possono rappresentare l'ammontare di perdite economiche oppure il numero di morti che si avrebbero a seguito del verificarsi di un evento catastrofico.

Per diminuire il rischio è possibile agire su entrambe le sue componenti, ovvero diminuire la probabilità di accadimento P o la conseguenze dell'evento C o entrambe contemporaneamente. Questo concetto è espresso chiaramente in [8] in termini molto diretti:

"Risks can be lessened by spending money but it is not possible to avoid risks entirely. In the end, society has to judge how much money it is worth spending to save each additional life. The difficulty faced by safety assessors lies in convincing regulators and decision-makers that at some point a process system is "safe enough" (p. 9)"

In ambito normativo il concetto di sicurezza viene di solito quantificato mediante la specificazione di *obiettivi di sicurezza (safety objectives)* numerici che possono essere utilizzati nelle analisi di sicurezza (*safety analysis*) e di rischio (*risk assessment*). Tali valori numerici riflettono il livello di sicurezza ritenuto accettabile dalla società e sono stabiliti dalle leggi o dalle norme di settore applicabili.

Sempre in [8] si legge, a proposito dei rischi associati agli impianti industriali (ma il concetto è del tutto generale):

"When risks have been identified and evaluated we can judge if these are "acceptable" or if we need to make modifications to the plant to improve its safety and reliability. It is obvious that we must make this judgment against realistic targets. (p.9)"

E ancora:

"Estimates of the risks existing in a particular plant must be compared against specific criteria of acceptability."

Il concetto di definizione di "specifici criteri di accettabilità" rappresenta dunque il punto fondamentale di partenza per la costruzione di qualunque normativa orientata alla sicurezza. Un obiettivo di sicurezza rappresenta uno specifico criterio di accettabilità del livello di rischio.

4.2 Definire gli obiettivi di sicurezza

Nell'ambito dell'aviazione civile tradizionale gli obiettivi di sicurezza sono stabiliti sulla base delle statistiche degli incidenti avvenuti nel corso della storia per una determinata classe di velivoli e tipologia di operazioni, come ad esempio gli elicotteri, il trasporto commerciale o l'aviazione generale. Gli obiettivi di sicurezza possono poi essere tradotti in requisiti numerici specifici di affidabilità per i vari (spesso numerosi) sistemi di cui è



composto il velivolo (*safety target*) espressi in termini di tasso (o meglio, probabilità) di guasto per ora di volo (*failure rate per flight hour*) e in termini di requisiti di affidabilità delle strutture per la resistenza statica, la resistenza a fatica e la stabilità del comportamento dinamico. Tutti questi requisiti di sicurezza sono di solito chiaramente definiti e scritti all'interno di normative tecniche di progetto denominate *standard di aeronavigabilità* (*airworthiness standard*) che in Europa sono dati dalle norme CS (*Certification Specifications*) emesse dall'EASA e negli Stati Uniti sono dati dalle norme FAR (*Federal Aviation Regulations*) emesse dalla FAA. In base alla Convenzione di Chicago (1944) sull'Aviazione Civile Internazionale [9] gli standard di aeronavigabilità, pur potendo differire tra i vari Stati contraenti, devono comunque tutti rispondere ai requisiti di alto livello stabiliti dall'Annesso 8 ICAO (*Airworthiness*) [1] alla Convenzione di Chicago e, in virtù di ciò, presentano un livello minimo di armonizzazione che costituisce la base tecnica affinché un aeromobile immatricolato in uno qualunque degli Stati contraenti la Convenzione di Chicago possa essere ammesso alla navigazione internazionale.

Gli standard di aeronavigabilità hanno il principale scopo di garantire un adeguato livello di sicurezza agli occupanti dell'aeromobile. La sicurezza delle terze parti a terra e degli altri utilizzatori dello spazio aereo (ovvero degli altri aeromobili con i quali si potrebbe avere una collisione o una interferenza in volo) è garantita indirettamente dal rispetto degli standard di sicurezza imposti a garanzia degli occupanti: in altre parole, se un aeromobile è progettato per non precipitare a terra e per non collidere in volo con un altro aeromobile al fine di proteggere i suoi occupanti, allora è evidente che indirettamente è progettato anche per proteggere i terzi sorvolati e gli occupanti degli altri aeromobili che impegnano lo stesso spazio aereo.

L'attuale complesso impianto legislativo e regolamentare oggi in essere per l'aviazione civile (essenzialmente in regime subsonico, se si tralascia la pur importante parentesi del *Concorde*), e che si è solo accennato sopra, è il frutto di un secolo di esperienza e continui aggiustamenti e miglioramenti normativi spesso mossi dalle lezioni provenienti dai vari incidenti occorsi nel tempo.

Per quanto riguarda il trasporto spaziale commerciale e il volo suborbitale e ipersonico in particolare, non è possibile vantare lo stesso livello di esperienza e maturità essendo il settore nella sua fase di infanzia e di sviluppo iniziale. E' necessario quindi iniziare il percorso normativo in maniera più flessibile consentendo al settore di potersi sviluppare in un quadro che inizialmente possa garantire la necessaria sicurezza alle persone sorvolate e agli utilizzatori dello spazio aereo e che successivamente, una volta acquisita la necessaria esperienza, possa concentrarsi sulla sicurezza degli occupanti mediante la definizione di adeguati e realistici standard di aeronavigabilità che regolino la progettazione del velivolo e di standard operativi e procedurali che ne regolino la costruzione, la manutenzione, etc.

Nella prima fase dell'attività di volo suborbitale e ipersonico gli obiettivi di sicurezza dovranno quindi essere stabiliti al fine di proteggere le terze parti al suolo e gli utilizzatori dello spazio aereo e dovranno essere contemporaneamente adottate delle raccomandazioni



tecniche e delle procedure atte a minimizzare il rischio per gli occupanti a bordo. Sempre nella prima fase delle operazioni suborbitali e ipersoniche, nel breve-medio periodo, in attesa di una piena integrazione con il traffico aereo e con le operazioni orbitali, la sicurezza degli utilizzatori dello spazio aereo potrà essere ottenuta mediante tecniche di segregazione dello spazio aereo, di cui si accennerà oltre.

L'obiettivo di sicurezza per le terze parti a terra può essere espresso mediante il concetto di numero medio accettabile di *casualty* per missione effettuata (E_c), dove con il termine *casualty* si intende una fatalità (morte) o un danno fisico serio (*death or serious injury*). Una *casualty* è in sostanza vista nell'ambito dell'analisi del rischio come un livello di severità³ *catastrofico*. Il numero medio accettabile di *casualty* per missione è stabilito in generale a priori dal legislatore o dal regolatore sulla base di criteri legati:

- i. alla equivalenza del rischio di questo tipo di attività con altre attività od operazioni simili attualmente esistenti; oppure
- ii. alla accettazione di tale rischio da parte della pubblica opinione, anche indirettamente [10].

In generale il livello di rischio accettabile sulla base della percezione pubblica diminuisce all'aumentare delle conseguenze dell'evento catastrofico e dipende di più dalle conseguenze dell'evento che non dalla probabilità di accadimento dello stesso; d'altra parte un rischio è tanto più accettabile quanto più è elevato il beneficio che l'operazione comporta per la società.

Al fine di stabilire un obiettivo di *safety* si applica usualmente un *principio di equivalenza* tra la nuova tipologia di operazioni e le usuali operazioni dell'aviazione civile o di altre tipologie di operazioni analoghe a quelle che si vogliono regolare, di cui si abbiano sufficienti dati a disposizione. In sostanza il principio di equivalenza richiede che il rischio posto alle terze parti a terra dai voli suborbitali e ipersonici non sia più alto di quello posto da altre tipologie di operazioni analoghe come le attività dell'aviazione civile o le operazioni di lancio e rientro militari, dando per assodato che, per il fatto che queste ultime operazioni avvengono usualmente, la società di fatto sta accettando questo livello di rischio.

Un possibile modo per definire un obiettivo di *safety* per le terze parti al suolo in termini di *casualty* per missione (E_c) è quello di prendere in considerazione, in base al principio di equivalenza, i dati di *casualty* registrati per l'aviazione commerciale internazionale come riportati ad esempio nei *Safety Report* annuali dell'ICAO [11]. Dai dati riportati in tale rapporto si ricava che il numero di *casualty* per missione registrato negli anni 2009-2013 è dell'ordine di grandezza di 10^{-5} (ovvero 1 su 100.000).

³ Usualmente si distinguono gli effetti di un evento non voluto in varie classi di "severità" in funzione della gravità degli effetti che il verificarsi dell'evento comporterebbe; tali classi comprendono, in ordine crescente di severità i livelli *Minor*, *Major*, *Hazardous* e *Catastrophic*.



Da notare che in base alla legge degli Stati Uniti [12], [13] nel caso di operazioni di lancio e rientro di veicoli spaziali commerciali (ad esempio durante voli suborbitali) al fine di garantire la sicurezza dei terzi a terra è richiesto un obiettivo di sicurezza $E_C = 3 \cdot 10^{-5}$ *casualty* attese per missione (valore massimo accettabile). Questo obiettivo è basato su un principio di equivalenza del rischio con i lanci spaziali operati dalla USAF⁴. Inoltre in [13] è evidenziato che, in ogni caso, tale obiettivo, una volta riportato in termini di rischio individuale su una popolazione campione di 100.000 abitanti, è diversi ordini di grandezza inferiore al rischio individuale di un cittadino USA dovuto a incidenti non lavorativi⁵. In termini pratici il rispetto di questo obiettivo di sicurezza significa che possono essere tollerate 30 *casualty* ogni milione di missioni effettuate. In definitiva quindi appare ragionevole assumere un obiettivo di sicurezza E_C dato da:

$$E_C = 3 \cdot 10^{-5} \text{ casualty per missione}$$

anche in ambito nazionale italiano, per lo meno in una fase iniziale sperimentale dell'attività dei voli suborbitali e ipersonici.

Indicando con R il rischio associato ad una data tipologia di missione, da uno specifico spazioporto, espresso quantitativamente come *numero medio di casualty* nel corso della missione, dovrà quindi risultare:

$$R \leq E_C.$$

L'obiettivo di sicurezza E_C espresso in termini di numero di *casualty* per missione rappresenta quindi un obiettivo di sicurezza collettivo, legato ai rischi accettabili per la comunità nel suo complesso.

⁴ La giustificazione dell'utilizzo dell'obiettivo di sicurezza di 30 *casualty* ogni milione di missioni è riportato in [13]: "This standard reflects the FAA's determination that the public will be protected from licensed commercial space missions such that risk confronting the public from a commercial space launch and reentry mission is significantly less than the average background risk experienced by the general public in daily activities. The 30×10^{-6} risk level is consistent with launch standards currently used at federal ranges (reference: Eastern and Western Range 127-1 Range Safety Requirements, Sec. 1.4(d), March 31, 1995)."

⁵ Leggiamo in [13] a tale proposito: "In order to compare expected casualty with voluntary annual individual risk, the expected casualty, which is a collective risk, must be converted to annual individual risk. For example, a collective risk of 30×10^{-6} for a defined population of one hundred thousand people exposed to a single launch results in a probability of injury or death to a single exposed individual of 3×10^{-10} . If there were one hundred launches per year, annual individual risk would be 3×10^{-8} . The U.S. annual individual probability of fatality due to a non occupational accident has been estimated as 2×10^{-4} (reference: Report No. 97/350-2.1-01, Acceptable Risk Criteria for Launches from National Ranges: Rationale, ACTA, for the Department of the Air Force, 30th and 45th Space Wings, September, 30, 1997). For the same defined population of one hundred thousand, there would be .003 casualties from commercial space operations and 20.0 fatalities from non-occupational accidents expected per year. Thus, the risk to the public from commercial space operations is several orders of magnitude less than the risk of fatality from accidents. It is noted that expected casualty is defined as a fatality or serious injury while the comparison statistics measure fatalities only."



Da questo è possibile poi derivare un livello individuale annuo di rischio effettuando alcune ipotesi. Si supponga ad esempio che nel prossimo futuro si svolga un'operazione di lancio o di rientro al giorno al di sopra di una zona in cui vi sono 10.000 abitanti; allora si avrà:

- Numero di *casualty* per missione (E_c) = $3 \cdot 10^{-5} = 3/100000$
- Numero di missioni in 1 anno = 365
- Numero di *casualty* in 1 anno = $365 \cdot 3/100000 = 1/100$ (circa)
- Numero di abitanti esposti al rischio: 10000
- Probabilità individuale di subire una *casualty* in 1 anno = $0.01/10000 = 1/1000000 = 10^{-6}$

Quindi nello scenario sopra descritto un individuo avrebbe una probabilità di 1 su 1 milione di subire una *casualty* in un anno. La probabilità individuale di 10^{-6} di subire una *casualty* per anno è in linea con le statistiche di mortalità nei paesi occidentali per cause non controllabili e non dovute alla volontà del singolo, riconducibili alla necessità di acquisire determinati tipi di benefici (ludici, ricreativi, economici, etc.), ovvero sostanzialmente per cause naturali o antropiche legate alla normale vita quotidiana tipica di una società tecnologica evoluta (in questo senso vi rientrerebbero anche i rischi legati ai trasporti in quanto percepiti ormai come facenti parte della vita quotidiana) [8].

4.3 Protezione delle infrastrutture critiche

Le infrastrutture critiche sono quelle infrastrutture che qualora colpite causerebbero vasti danni diretti e indiretti alla sicurezza delle persone, all'economia, alla difesa o all'ambiente non tollerabili dalla società o dallo Stato in ogni caso, anche a fronte di una bassa probabilità di accadimento. Infatti qualora gli effetti di un evento negativo (catastrofico) siano molto alti la percezione pubblica del rischio, come detto, sarebbe anch'essa molto elevata indipendentemente dalla bassa probabilità di accadimento dell'evento.

In questi casi dovrà essere prevista la chiusura dello spazio aereo al disopra di tali aree critiche istituendo delle *No Fly Zone*, escluse dai corridoi di lancio e di rientro (i quali devono includere anche le zone di probabile ricaduta dei detriti in caso di esplosione in volo). Si parla anche in tal caso di *OEZ (Overflight Exclusion Zone)*.

Occorre infine osservare che imporre delle *OEZ* ovvero che i corridoi di lancio e di rientro non includano infrastrutture critiche rappresenta solo una garanzia ad un certo *livello confidenza*⁶ (e non la certezza!) in quanto i confini dei corridoi stessi, come si vedrà più oltre, sono stabiliti in termini probabilistici; i corridoi di volo sono infatti definiti come

⁶ In statistica e calcolo delle probabilità un livello di confidenza p associato ad un insieme (intervallo) di valori A (dove ad esempio può essere $A=[a,b]$ un intervallo reale) rappresenta la probabilità che una certa variabile aleatoria X assuma valori in A ; detto in altri termini: $P(X \in A) = p$. L'intervallo A si chiama intervallo di confidenza della variabile aleatoria X a livello di confidenza p .



quelle zone a terra in cui la probabilità di cadere del veicolo o di sue parti, nel caso di avaria, malfunzionamento o esplosione nel corso della traiettoria programmata, è molto alta (pari ad esempio il 99,7% corrispondente ad un livello di confidenza " 3σ ")⁷ ma non pari ad 1. Questo significa in sostanza che vi sarà sempre una minima probabilità che il veicolo o i suoi detriti cadano al di fuori dei corridoi previsti: tale probabilità rappresenta il necessario rischio residuo che deve essere tollerato al fine di permettere concretamente le operazioni (l'unico modo di ottenere una sicurezza "assoluta" sarebbe infatti quello di vietare ogni tipo operazione!).

5 La via italiana al volo spaziale commerciale

5.1 Le iniziative italiane in campo regolamentare

Le iniziative italiane in campo per il sostegno allo sviluppo del volo spaziale commerciale in generale e del volo suborbitale e ipersonico in particolare prendono le mosse dal *Memorandum of Cooperation* [14] per lo sviluppo dei voli suborbitali firmato nel marzo del 2014 dalla FAA-AST degli Stati Uniti e dall'ENAC, seguito poi da una specifica Lettera di Intenti firmata dall'ENAC e dall'AMI, e dalle attività culturali portate avanti dal CESMA in particolare con l'istituzione del Gruppo di Lavoro sul Volo Ipersonico.

L'ENAC, in virtù del ruolo di Autorità unica dell'aviazione civile nazionale, riconosciute dal Codice della Navigazione, si è fatta carico di partecipare e di dare impulso alle iniziative necessarie per poter arrivare in tempi ragionevoli a definire un quadro regolamentare nazionale atto a consentire le operazioni suborbitali sul territorio e nello spazio aereo Italiani favorendo al contempo lo sviluppo del settore e il posizionamento strategico dell'Italia nel quadro internazionale.

A tale scopo l'ENAC partecipa a livello internazionale alle attività bilaterali con la FAA-AST in virtù del MoC del 2014, che è stato rinnovato nel 2016 ed ampliato all'ASI, e al Gruppo di Lavoro ICAO/UNOOSA denominato *Space Learning Group* [15] che ha lo scopo di analizzare le diverse normative nazionali del settore del volo spaziale commerciale per poi proporre, in prospettiva alle organizzazioni internazionali delle Nazioni Unite preposte all'Aviazione Civile (ICAO) e al controllo delle attività spaziali (UNOOSA) una normativa armonizzata che consenta la completa integrazione della attività suborbitali con le attività aeronautiche e orbitali. Il mandato ufficiale dello *Space Learning Group* è riportato nel relativo *Work Statement* [15]:

⁷ Un livello di confidenza " 3σ " (3-sigma) significa un livello di confidenza $p=0.997$ (cfr. nota 9). Tale notazione deriva dal fatto che per una variabile aleatoria reale X avente distribuzione normale (gaussiana) con media m e deviazione standard σ l'intervallo di confidenza al livello $p=0.997$ è dato da $[m-3\sigma, m+3\sigma]$, ovvero: $P(X \in [m-3\sigma, m+3\sigma])=0.997$ qualunque siano i valori di m e di σ .



“The recent developments in the space transportation industry, specifically the potential increased frequency of suborbital launches, have focused attention on how these activities can be integrated into non-segregated airspace. In anticipation of the imminent growth of the space sector, ICAO jointly with the United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA) launched a learning group comprised of those actively engaged in these activities to better understand the industry’s future needs and, in particular, begin to plan for more routine activity in non-segregated airspace. The Space Learning Group compiled relevant regulatory material from Member States (...) and was asked to develop an information text to be included in the GASP. ICAO and UNOOSA also conduct regular symposia as a means to raise awareness and gather best practices of this emerging sector”

A livello nazionale si è inteso agire contemporaneamente su due piani complementari, ovvero: (i) a livello politico-istituzionale e della comunicazione, con l’istituzione del *Gruppo di Lavoro sul Volo Iperpersonico* del CESMA (di cui il presente documento rappresenta una parte del lavoro) e (ii) a livello tecnico-operativo e regolamentare con l’istituzione da parte dell’ENAC del *Gruppo di Lavoro sui Voli Suborbitali*. Quest’ultimo, istituito dall’ENAC [16] nell’ambito della propria missione istituzionale e aperto ai soggetti istituzionali coinvolti, ha l’obiettivo di definire, a partire dai criteri e dalle linee guida espressi nella *draft policy* ENAC del 2015 sul Volo Spaziale Commerciale [6] una *Roadmap regolamentare* che porti alla graduale costruzione di un quadro regolamentare nazionale efficace e, al contempo, flessibile, in grado di consentire le operazioni suborbitali in Italia già a partire dal breve e medio periodo (2020).

Il Gruppo di Lavoro sui Voli Suborbitali dovrà quindi identificare ed analizzare tutti gli aspetti e le problematiche che attengono alle attività connesse con il volo suborbitale e ipersonico, ad iniziare dagli aspetti giuridici. In particolare dovranno essere esaminati i diversi aspetti che concorrono alla sicurezza delle operazioni effettuando proposte normative relative, tra gli altri aspetti, alla analisi del rischio, ai requisiti di progettazione e produzione, alle operazioni e agli spazioporti, alla gestione dello spazio aereo, agli aspetti medici, ai requisiti per i piloti, l’equipaggio e i partecipanti, ai requisiti ambientali, agli aspetti assicurativi, etc.⁸

5.2 La roadmap regolamentare

Il Gruppo di Lavoro sui Voli Suborbitali ha quindi lo scopo di analizzare l’attuale quadro legale nazionale, europeo e internazionale proponendo la costruzione di un quadro regolamentare coerente, flessibile e armonizzato che possa consentire l’effettuazione dei

⁸ Le problematiche discusse nel presente documento rispecchiano anche il lavoro condotto fino a questo momento all’interno del Gruppo di Lavoro sui Voli Suborbitali.



voli suborbitali in Italia entro i prossimi 4 anni. Il primo passo sarà quello di redigere una linea guida per il rilascio di autorizzazioni per voli suborbitali sperimentali effettuati da operatori USA, successivamente si espanderà in modo graduale il campo di applicazione della regolamentazione. La *roadmap* regolamentare prevede ad oggi i seguenti obiettivi strategici a breve, medio e lungo periodo⁹:

(1) **Obiettivo di breve periodo (2020) –**

Regolazione dei voli suborbitali sperimentali.

(2) **Obiettivo di medio termine (2025) –**

Regolazione dei voli suborbitali con partecipanti a bordo diversi dall'equipaggio.

(3) **Obiettivo di lungo termine (2030) –**

Regolazione di operazioni commerciali suborbitali e spaziali per il trasporto di persone e merci ed eventualmente per la messa in orbita di piccoli satelliti su base regolare, in modo armonizzato a livello europeo ed internazionale.

L'obiettivo di breve periodo sarà perseguito inizialmente mediante la definizione di un quadro regolamentare nazionale che consenta l'effettuazione di voli suborbitali sperimentali operati da un operatore USA in regime di *wet lease* da uno spaziorporto italiano, mediante un processo di riconoscimento e validazione delle licenze e dei permessi di volo statunitensi rilasciati dalla FAA-AST, cui si aggiungeranno eventuali ulteriori requisiti nazionali che scaturiranno dalla specificità del quadro legale e regolamentare italiano (eventualmente modificato *ad hoc*). Tale approccio appare il più realistico in quanto ad oggi gli unici operatori in grado di effettuare voli suborbitali sono quelli statunitensi. Permettere loro di volare da e sul territorio italiano costituirà un volano per lo sviluppo futuro del settore che coinvolgerà, oltre alle agenzie istituzionali, le università, gli enti di ricerca, le industrie aerospaziali potenzialmente in grado di progettare e produrre uno spaziorpiano e le società di gestione dei futuri spaziorporti. L'importanza di cominciare da subito tali attività risiede poi anche nel fatto che, una volta avviate, queste costituiranno giocoforza un riferimento cui dovranno ispirarsi nel prossimo futuro gli enti regolatori sovranazionali (l'Unione Europea tramite l'EASA, e l'ICAO) quando decideranno di definire un quadro regolamentare uniforme e cogente cui gli Stati Membri UE e gli Stati contraenti ICAO¹⁰ dovranno adattarsi. Iniziare prima significherà quindi essere pronti dopo e potersi adattare al futuro quadro internazionale con minore sforzo. E' questa d'altra parte la politica attuale degli Stati

⁹ Le date riportate sono, allo stato, indicative e soggette quindi a possibili aggiornamenti.

¹⁰ Con il termine Stati Membri si intende qui ricomprendere sia gli Stati Membri dell'UE sia gli Stati Terzi non appartenenti all'UE ma che sono comunque membri dell'EASA; con il termine Stati Contraenti si intendono invece gli Stati firmatari della Convenzione di Chicago sull'Aviazione Civile Internazionale e che sono quindi membri dell'ICAO.



Uniti che si stanno impegnando moltissimo a promuovere ed esportare all'estero il proprio modello normativo per i voli spaziali commerciali e per gli spaziorporti.

5.3 Autorizzare i voli suborbitali sperimentali

Come detto i primi voli suborbitali dal territorio italiano dovrebbero essere dei voli sperimentali, senza partecipanti a bordo diversi dall'equipaggio, operati in regime di *wet lease* da un operatore USA con lancio/decollo e rientro/atterraggio da uno spaziorporto italiano. Per ottenere questo obiettivo occorre definire almeno i seguenti aspetti regolamentari:

- Chiarire la natura dello spaziorpiano come aeromobile in accordo alla definizione ICAO di aeromobile [1]: *Aircraft. Any machine that can derive support in the atmosphere from the reaction of the air (...)*.
- In tal modo i voli sperimentali potrebbero ricadere all'interno delle previsioni dell'Annesso II del Regolamento Europeo EU 216/2008 (e successive modifiche), chiamato brevemente “Regolamento Basico” [17], che consentirebbe a questo tipo di operazioni di essere regolate a livello nazionale sotto certe limitazioni, come quella di operare esclusivamente all'interno dello spazio aereo nazionale.
- Riconoscimento e validazione della licenza o del permesso di volo FAA dello spaziorpiano.
- Individuazione di eventuali requisiti aggiuntivi specifici, da richiedere all'operatore dello spaziorpiano in aggiunta a quelli imposti dalla FAA per l'ottenimento della licenza o del permesso di volo, come ad esempio (ma non solo) nei seguenti ambiti:
 - Controllo e gestione della configurazione;
 - Utilizzo appropriato dei dati di densità di popolazione utilizzati nel *risk assessment*;
 - Manutenzione e gestione dell'aeronavigabilità continua;
 - Monitoraggio in tempo reale della traiettoria, in particolare al di fuori dello spazio aereo controllato dall'ATM;
 - Accordi tra l'operatore, le agenzie nazionali e le istituzioni locali coinvolte a vario titolo nelle operazioni come ENAV, AMI, Guardia Costiera, polizia locale, etc;
 - Aspetti assicurativi;
 - Consenso informato per l'equipaggio e, in futuro, per gli eventuali partecipanti non appartenenti all'equipaggio.



- Definizione dei requisiti per lo spazioporto (modellati su quelli USA e complementati da quelli nazionali in particolare per gli aspetti ambientali, di rumore e di sicurezza delle infrastrutture) e identificazione di uno spazioporto idoneo ad accogliere le operazioni.

Ognuno degli aspetti predetti richiederà un accurato studio e potrà essere praticamente implementato solo a fronte di un accordo bilaterale vincolante tra l'Italia e gli Stati Uniti a livello intergovernativo o quanto meno (e qualora possibile) a livello di agenzie regolatrici (ENAC/FAA) avente lo scopo di:

- Definire chiaramente la ripartizione di giurisdizione e di responsabilità tra Italia e Stati Uniti (e, quindi tra FAA ed ENAC);
- Riconoscere e accettare da parte dell'Italia gli obiettivi di sicurezza utilizzati dall'FAA per il rilascio delle proprie approvazioni (come ad esempio l'obiettivo di sicurezza di $3 \cdot 10^{-5}$ *casualty* per missione utilizzato negli USA);
- Definire le procedure tecniche di implementazione dell'accordo bilaterale (TIP – *Technical Implementation Procedures*).

6 Sostenere lo sviluppo in sicurezza

6.1 L'approccio basato sulla centralità delle operazioni

La *draft policy* ENAC [6] fornisce alcune indicazioni su come affrontare il problema di garantire un livello minimo accettabile di sicurezza per le terze parti a terra in assenza di standard di aeronavigabilità per lo spazioporto. Analogamente a quanto sta avvenendo nel settore degli RPAS, nel caso di RPAS non certificati, il problema della sicurezza per le terze parti a terra viene affrontato mediante la metodologia del *Total Hazard Risk Assessment* che, come più oltre si vedrà meglio, rappresenta una metodologia di analisi del rischio che tiene in conto *tutti* i possibili rischi e *tutte le possibili cause di rischio (hazards)* associate ad una specifica operazione, di uno specifico spazioporto, in uno specifico periodo di tempo, da uno specifico spazioporto.

Un tale approccio alla sicurezza viene chiamato *operation centric* in quanto basato sulla centralità delle operazioni: esso non prende in considerazione la sicurezza del veicolo in sé, come si farebbe in un approccio certificativo tradizionale, ma considera l'insieme del veicolo e della specifica operazione che deve portare a termine, analizzandone globalmente i rischi. Questo approccio funziona solamente qualora si possa condurre una dettagliata e robusta analisi dei rischi e, soprattutto, qualora si sia effettivamente in grado di mettere in atto tutte le mitigazioni che scaturiscono da tale analisi; inoltre ha il vantaggio di ottenere delle autorizzazioni in tempi ragionevoli a fronte del fatto, però, che l'autorizzazione non



varrà in generale per ogni operazione dello spaziplano ma dovrà essere in generale rinnovata di volta in volta. Anche per questo motivo l’approccio basato sulla centralità delle operazioni rappresenta inevitabilmente una fase di passaggio verso un approccio più tradizionale basato sul rilascio di certificazioni al veicolo, allo spazioporto e alle organizzazioni coinvolte, con lo scopo di poter effettuare diverse tipologie di operazioni senza che ogni volta si debba ripetere una nuova analisi del rischio e richiedere una nuova autorizzazione.

Il riconoscimento delle licenze e dei permessi di volo statunitensi rilasciati dalla FAA-AST costituisce un elemento centrale dell’approccio *operation centric* che si intenderebbe seguire a breve termine per autorizzare i primi voli suborbitali; a tale scopo sarà necessaria una attenta e dettagliata analisi della normativa statunitense (14 CFR Chapter III, Part 400-460)¹¹ al fine di capire come poterla adattare al contesto legale e normativo italiano: quali requisiti possono essere direttamente applicabili, quali hanno necessità di essere modificati e quali sono invece gli eventuali nuovi requisiti, aggiuntivi, da imporre.

In tale contesto uno strumento importante per gestione in sicurezza è il possesso da parte delle organizzazioni coinvolte nelle operazioni – essenzialmente l’operatore dello spaziplano e il gestore dello spazioporto – di un adeguato SMS (*Safety Management System*) nell’ambito del quale svolgere l’analisi dei rischi e gestire le conseguenti azioni di mitigazione. A tale proposito in [6] è raccomandato quanto segue:

“The operator should implement the management of spaceplane design, production, maintenance and operational risks as an integral part of an approved Safety Management System. This should include the continuing airworthiness issues. ENAC should develop and define an acceptable methodology for developing the global risk assessment, to be implemented by the operator. (...) The methodology to be developed should give due recognition to FAA AST verification of these assessments, allowing the operator – at the same time – to show compliance with the possible “delta requirements” that ENAC could mandate to fill the gap between the US and Italian regulation.”

¹¹ L’approccio basato sulle licenze, adottato dalla FAA-AST negli USA, è descritto brevemente nella *draft policy* ENAC [6], al Para. 2: “In the US, space regulation is the responsibility of the FAA AST, under the Commercial Space Launch Act 1984 (CSLA). The FAA AST issues licences and permits for commercial launches of orbital rockets and sub-orbital rockets – including spaceplanes. For a commercial space launch, two licences are required: one for the vehicle (or the operator) and one for the launch site (spaceport). Vehicle licences are granted based on acceptance of an application supported by information about payload, environmental impact and safety (giving comprehensive details of the launch schedule, trajectory and the systems being used). Suddenly, FAA AST performs a sort of mandatory technical investigation (familiarisation phase) on the content of the application and on the operator. The FAA AST has a six months time to review each formal licence application. A similar but longer procedure applies to obtain a licence for the launch site: the mandatory environmental impact assessment can take up to two years. Obtaining a new licensed launch site appears to be a critical timeline issue for an operator willing to expand his area of operations. Once licensed for a specific type of flight with a specific type of spaceplane, the operator may easier extend his licence with slightly different payloads or trajectories or with similar type of spaceplane from the same site. One essential requirement for every flight involving paying participants is the ‘informed consent’ signed by each participant. Additionally, a holder of a launch licence or permit must inform any crew and spaceflight participants that the US Federal Government has not certified the launch vehicle as safe and a reusable launch vehicle operator must inform a spaceflight participant in writing about the risks of launch and re-entry, and the safety record of the vehicle type (Section 50905 of the 2004 Amendment to the CSLA).”



E' chiaro infine, che un minimo livello di sicurezza dovrà esse garantita anche agli occupanti dello spaziolano (equipaggio e partecipanti) al di là di ogni formale assunzione consapevole dei rischi legati alle operazioni che essi dovrebbero comunque assumersi mediate la firma di un consenso informato. Ad oggi non esistono, tuttavia, delle norme tecniche o procedurali obbligatorie (come gli *standard di aeronavigabilità*) per il progetto, la produzione e la manutenzione (*aeronavigabilità continua*) degli spaziolani, anche se vi sono raccomandazioni per l'utilizzo di diversi standard industriali, della NASA, dell'ESA o di altre organizzazioni come la IAASS [18] relativi al volo spaziale umano. Al momento, ai fini della sicurezza degli occupanti la FAA ha emesso solamente delle linee guida di requisiti raccomandati ma non obbligatori [19]; tale situazione, tuttavia, potrebbe presto mutare in quanto la stessa FAA, in base al mandato ricevuto dalla legge USA, potrebbe presto iniziare ad emettere degli standard contenenti requisiti obbligatori per la progettazione dello spaziolano allo scopo di garantire, oltre alla sicurezza delle terze parti a terra, anche quella degli occupanti [20].

6.2 L'analisi globale dei rischi

Affinché l'approccio basato sulle operazioni possa essere applicato occorre stabilire una metodologia di analisi del rischio che tenga in conto, come detto, tutti i possibili rischi e tutte le potenziali situazioni e cause di rischio che possono incontrarsi nel corso della specifica operazione da autorizzare – *Total Hazard and Risk Assessment*. In particolare dovranno essere presi in conto anche i rischi derivanti dalla progettazione e dalla costruzione del veicolo in quanto esso non sarà dotato di una propria certificazione o attestazione di sicurezza; motivo per cui deve essere richiesta agli occupanti la firma di un chiaro consenso informato, accertandosi che l'equipaggio e in particolare gli eventuali partecipanti diversi dall'equipaggio, siano perfettamente consapevoli dei rischi che affronteranno e che accetteranno volontariamente.

Un esempio significativo di applicazione del concetto di *Total Hazard and Risk Assessment* – applicabile a livello di metodologia e di criteri anche al caso del volo suborbitale e ipersonico – è il modello SORA (*Safety Operational Risk Assessment*) in fase di sviluppo da parte del JARUS (*Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems*) per i sistemi aerei a pilotaggio remoto (RPAS, *Remoted Piloted Aircraft Systems*) meglio noti al pubblico come *droni*. Tale approccio si basa sulla metodologia di analisi chiamata *Bow Tie* [21], [22].

Al fine di poter descrivere questo modello è necessario dare preliminarmente una definizione di *Hazard* [23] come:

“A state or a set of conditions, internal or external to a system, that has the potential to cause harm. (NASA NPR 8715.3C)”

E' importante qui osservare come un *Hazard* sia definito come un *insieme di condizioni*, potremmo dire di “eventi”, al verificarsi delle quali si avrebbe un effetto negativo. Un



Hazard è costituito da tre elementi o condizioni fondamentali [23] che devono verificarsi contemporaneamente al fine di produrre l'effetto negativo; ci deve essere: (i) un *elemento azzardoso* (HE – *Hazardous Element*) come ad esempio una fonte di energia in grado potenzialmente di produrre dei danni, (ii) un *meccanismo di innesco* (IM – *Initiating Mechanism*) in grado di innescare l'elemento azzardoso e (iii) un *Target* (T) che subisce gli effetti negativi del verificarsi dell'*Hazard*. Se manca l'elemento azzardoso è evidente come manchi oggettivamente la fonte del rischio; se manca l'elemento di innesco, la fonte del rischio non può espletare i propri effetti; se, infine, manca un *Target* il verificarsi dell'evento dannoso non ha importanza perché non vi è comunque produzione di un danno (per lo meno di un certo tipo di danno che interessa, come ad esempio una *casualty*). Il caso della fonte di energia, come un serbatoio di carburante, è molto chiaro: essa costituisce l'elemento azzardoso; una scintilla può rappresentare l'elemento di innesco ed eventuali persone nelle vicinanze costituiscono eventuali target.

Di seguito si riporta il concetto di *Bow Tie* come concisamente riassunto dall'Autorità Aeronautica Svizzera (FOCA) in [22]. La metodologia consiste di tre passi fondamentali:

- 1) Individuare tutti i possibili eventi azzardosi (*Hazards*) che sono collegati alle operazioni da svolgere;
- 2) Individuare le cause che conducono agli *Hazards*;
- 3) Individuare un numero sufficiente di barriere di sicurezza (*safety barrier*) da implementare al fine di ridurre il rischio derivante dall'eventuale verificarsi dell'*Hazard*.

Il modello è descritto di seguito.

6.3 Il modello *Bow-Tie*

“To aid in the modeling effort a systematic way of representing accident scenarios is needed. The core of a model based on accident scenarios is formed by events that may lead to accidents if safety barriers are breached. Because these events may lead to accidents they can be described as hazards. These hazards themselves occur due to sequences of events starting at a particular root cause. A particular hazard can be caused by multiple root causes, and the hazard can evolve in several types of accident. This is often represented by a bow tie, see Figure¹² 6-1

¹² La numerazione delle figure da Figura 6-1 a Figura 6-4 è stata modificata rispetto a quella riportata nel riferimento [22] per congruenza con il resto del documento.

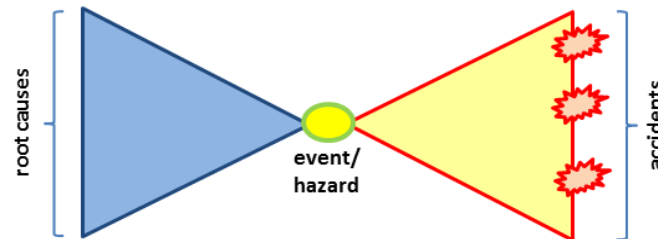


Figure 6-1. Bow Tie

To represent the total aviation system multiple bow-ties are needed to capture all hazards that can lead to accidents. The failure of safety barriers after a hazard takes place also has root causes. These root causes also need to be represented in the model. (...) the accident scenarios are represented using event sequence diagrams (ESD) and fault trees.

An ESD consists of an initiating event, pivotal events and end states. A representation of a generic ESD is given in Figure 6-2. ESDs provide a qualitative description of series of events leading to accidents. Because pivotal events can also cause avoidance of an accident, an ESD also models scenarios which lead to incidents and reportable occurrences. An initiating event represents the start of the main accident scenario. The initiating event of course also may have causes, and they are represented in a fault tree. Each pivotal event represents a possibility for the safety occurrence to develop into an accident, or a possibility that the accident is avoided. If all pivotal events contribute towards an unwanted outcome, than the end state is an accident or serious incident. If a pivotal event causes avoidance of an accident the end state is a safe continuation of the flight. A single ESD therefore can represent more than one accident scenario, and also represents accident avoidance scenarios. In case of the generic ESD, there are 2 accident scenarios and 2 accident avoidance scenarios, see the solid red (accident) and dashed yellow (accident avoidance) lines in Figure 6-3.

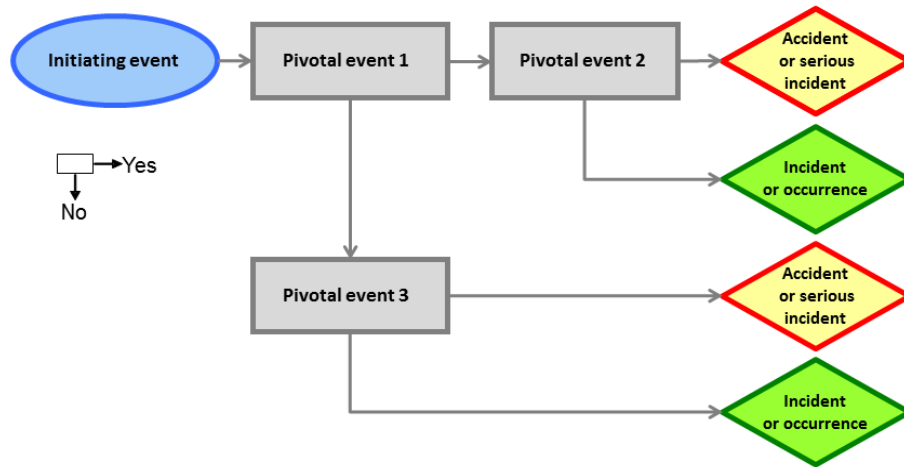


Figure 6-2. Generic representation of an ESD

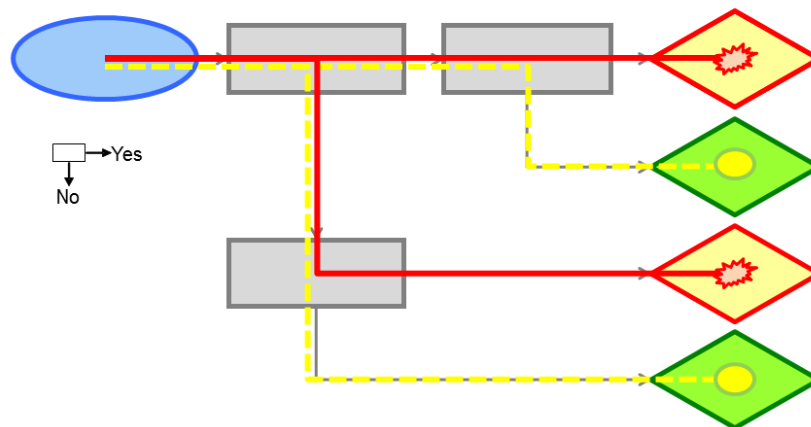


Figure 6-3. Representation of accident scenarios (red) and accident avoidance scenarios (yellow) in an ESD

An ESD with its associated fault trees can be seen as a combination of bow ties. This is visualized in Figure 6-4. Each fault tree can be seen as the left side of a bow tie, while the combination of pivotal events can be seen as the right side of a bow tie. Multiple ESDs are needed to represent the total aviation system.

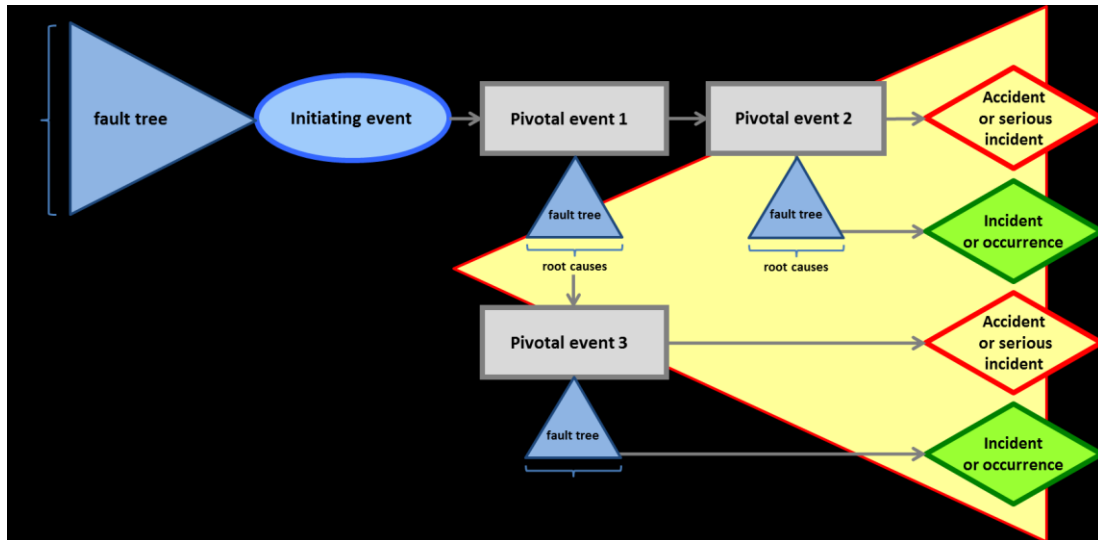


Figure 6-4: ESD bow tie

Fault trees are used to represent the root causes of both the initiating event and the pivotal events of an ESD.”

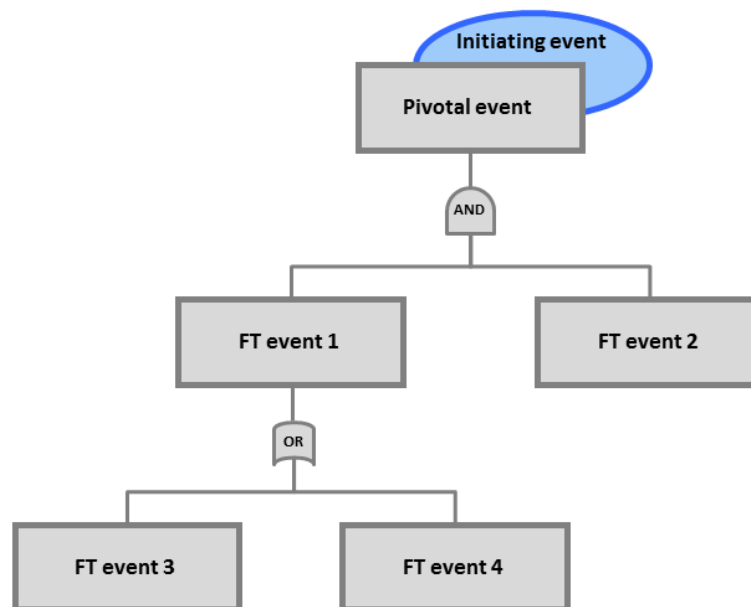


Figure 6-5. Generic representation of a fault tree

Una buona e completa descrizione della *Fault Tree Analysis* è riportata in [24].



6.4 La valutazione del rischio per le terze parti a terra

Seguendo [13] e [25] è possibile ottenere un modello di rischio da utilizzare per definire delle condizioni operative che garantiscono i livelli di sicurezza per le terze parti a terra definiti dagli obiettivi di sicurezza stabiliti (rif. Para. 4). Tali condizioni si esplicitano nell'imporre dei tempi massimi di sorvolo al disopra di zone a diversa densità di popolazione.

Come già anticipato, per valutare il livello di protezione offerto deve essere inizialmente definito un obiettivo di *safety* in termini di numero medio ammesso di *casualty* per missione (E_c) (rif. Para. 4).

In termini probabilistici il parametro E_c rappresenta *il massimo* del valore medio del numero aleatorio di *casualty* per missione e rappresenta il *rischio massimo accettabile per missione*. Il *rischio per missione* è indicato con R_c e rappresenta il valore medio *stimato* del numero di *casualty* che si possono avere in una missione; esso dovrà quindi essere non superiore al limite massimo E_c :

$$R_c \leq E_c$$

Il rischio R_c per missione è espresso come la probabilità P_c che si abbia un (qualunque) evento che provochi la caduta incontrollata a terra del veicolo o di una delle sue parti nel corso della missione, moltiplicato per il numero medio di persone N_c previste all'interno dell'area letale A_c associata al veicolo o alla sua parte.

L'*area letale* A_c è quell'area associata ad un oggetto che impatti al suolo, tale per cui ogni persona al suo interno verrebbe colpita e, quindi – per ipotesi – subirebbe una *casualty* a causa dell'impatto, della eventuale esplosione o della proiezione di detriti del terreno; essa rappresenta quindi l'impronta letale a terra della parte. L'area letale A_c dipende da alcuni parametri progettuali ed operativi che sono essenzialmente le seguenti:

- la dimensione massima della parte;
- l'angolo di volo all'impatto;
- la quantità di materiale esplosivo presente al momento dell'impatto.

E' importante osservare che l'area letale A_c , essendo di fatto *l'area dell'impronta efficace a terra* della parte al momento dell'impatto, non dipende in prima approssimazione dalla massa¹³ della parte ma dipende, essenzialmente, dalle sue dimensioni. In linea di principio l'area letale può variare nel corso della missione al variare dei suddetti parametri. Maggiori dettagli sulla determinazione dell'area letale possono trovarsi in [13] e [25].

¹³ Una dipendenza dell'area letale di impatto dalla massa si può avere in effetti considerando che maggiore è l'energia cinetica all'urto, maggiore è il percorso al suolo compiuto da eventuali detriti prima di smaltire tale energia e fermarsi. Tale aspetto può essere tenuto in conto introducendo nelle formule dell'area letale di impatto opportuni fattori amplificativi.



Il numero medio N_C di persone potenzialmente presenti a terra all'interno dell'area letale dell'oggetto in caduta è espresso semplicemente come il prodotto dell'area letale A_C per la densità media di popolazione D caratteristica della zona in cui si trova l'area di impatto. Il rischio per missione si esprime quindi come:

$$R_C = P_C \cdot N_C = P_C \cdot A_C \cdot D$$

Nel caso in cui l'area delle operazioni non abbia sufficienti caratteristiche di uniformità rispetto alla densità di popolazione, come ad esempio nel caso in cui essa comprenda sia centri abitati sia aree non urbanizzate, è possibile suddividerla, secondo determinati criteri, in un certo numero m zone A_i caratterizzate da una densità di popolazione uniforme D_i ($i=1, \dots, m$). Indicheremo con P_{C_i} la probabilità che si abbia un evento nel corso della missione che provochi la caduta all'interno della zona A_i di densità uniforme D_i . Inoltre avremo, in linea di principio, un valore di area letale A_{C_i} ($i=1, \dots, m$) diverso per ogn'una delle m zone sorvolate.

Il rischio R_C relativo al veicolo intero o ad una sua parte può quindi essere espresso come somma dei rischi relativi alle diverse zone sorvolate di diversa densità di popolazione:

$$R_C = P_{C_1} \cdot A_{C_1} \cdot D_1 + \dots + P_{C_m} \cdot A_{C_m} \cdot D_m$$

E' evidente che qualora si abbia *più di una parte* in caduta occorrerà sommare i rischi relativi su tutte le parti per avere il rischio complessivo. Tale condizione deve essere utilizzata congiuntamente al vincolo che impone che la somma delle probabilità per una singola parte di cadere nelle varie zone sorvolate nel corso della missione sia uguale alla probabilità complessiva di cadere nel corso della missione:

$$P_{C_1} + P_{C_2} + \dots + P_{C_m} = P_C$$

Tale vincolo è giustificato dal fatto che la probabilità complessiva di caduta a terra nel corso della missione (P_C) è la probabilità dell'unione di *eventi mutuamente esclusivi* dati dal verificarsi della caduta a terra della parte nelle varie zone sorvolate. La mutua esclusività deriva dal fatto che, nell'ambito di una missione, la caduta di una parte può aversi in una ed una sola zona.

Il valore della probabilità P_C e delle probabilità P_{C_i} può essere stimato o mediante un'analisi di *safety* quantitativa (ad esempio utilizzando il modello *Bow Tie*, o altri metodi) o mediante l'esperienza di servizio e il giudizio ingegneristico. Tuttavia ai fini di una corretta applicazione del modello di analisi del rischio è di fondamentale importanza tenere presente che tali probabilità derivano sia da *cause tecniche* (progettuali) di avaria e malfunzionamento dei sistemi e delle strutture del un veicolo, sia da *cause operative*, come ad esempio il tempo meteorologico, il pilotaggio, il controllo del traffico etc.

Il modello può essere ulteriormente raffinato ammettendo che la probabilità di caduta P_{C_i} nella zona A_i di densità uniforme D_i possa – sotto certe ipotesi – essere considerata proporzionale alla probabilità complessiva di caduta a terra P_C nel corso dell'intera missione e al tempo di transito T_i all'interno della zona A_i del punto *Punto Istantaneo di Impatto* (IIP



– *Instant Impact Point*) del veicolo o della parte. L'IIP del veicolo o di una sua parte può essere definito come il *punto nominale di impatto a terra ottenuto a partire da un dato punto della traiettoria nominale del veicolo nel quale si verifici un evento (avaria o malfunzionamento) che conduca alla caduta a terra del veicolo o di una sua parte*. La probabilità P_{Ci} ($i=1, \dots, m$) si può quindi esprimere come:

$$P_{Ci} = \frac{T_i}{T}$$

dove T è il tempo totale di durata della missione.

Dalle relazioni precedenti infine, imponendo che il rischio totale R_c della missione non superi il valore E_c , è possibile ottenere delle condizioni sui tempi di volo massimi per le varie fasi della missione al disopra di ogni singola zona di densità di popolazione uniforme, tali da garantire il rispetto dell'obiettivo di sicurezza. Il tempo di sorvolo di una certa zona può essere successivamente ricostruito a partire dalla traccia dell'IIP.

6.5 Il corridoio di volo

Al fine di determinare quali sono le aree a terra da dover prendere in considerazione nell'analisi del rischio occorre determinare i corridoi volo dello spazipiano e, più in generale la traccia a terra dei punti istantanei di impatto che si possono avere a partire dalla traiettoria nominale, associati al veicolo integro o alle parti in cui esso può suddividersi a seguito di un evento catastrofico. A tale scopo occorre prima di tutto definire la traiettoria nominale del veicolo e poi, in ogni punto di questa determinare quali possono essere tutte le avarie e i malfunzionamenti o altre cause operative che possono verosimilmente aversi in questi punti e che possono condurre alla caduta incontrollata a terra del veicolo o della parte. Dopo di che, a partire da ogni punto della traiettoria nominale in cui è possibile avere tali eventi, si determina l'*area probabile di impatto a terra* come quell'area in cui vi è una probabilità elevata (tipicamente il 99,7% corrispondente ad un livello di confidenza di 3-sigma¹⁴) che la parte cada al suo interno.

L'area probabile di impatto può essere calcolata mediante tecniche di simulazione Monte Carlo o mediante la tecnica di analisi di propagazione degli errori sui parametri della traiettoria nominale (metodo di propagazione della matrice di covarianza). In Figura 6-6 è riportato lo schema di principio per il calcolo dell'area probabile di impatto.

¹⁴ Cfr. nota 11

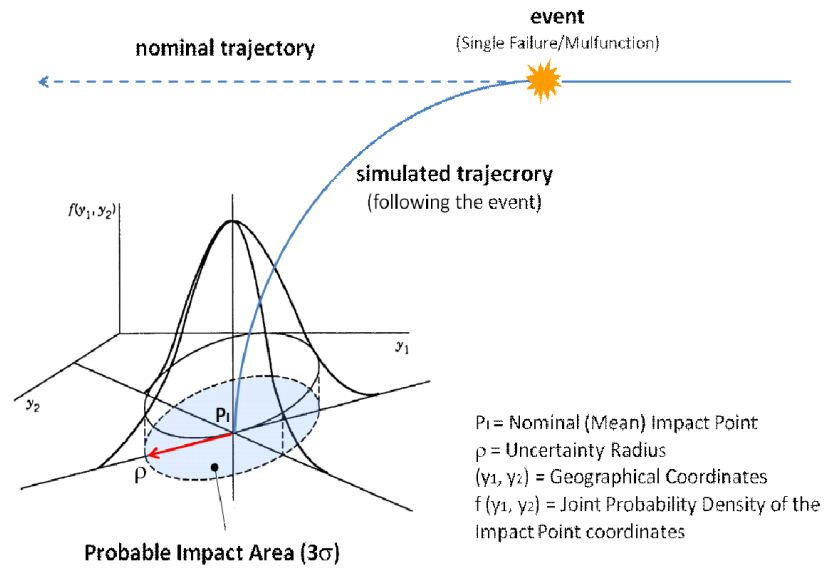


Figura 6-1 – Schema di principio per il calcolo dell'area probabile di impatto. Figura tratta da [8]

L'insieme di tutte le aree probabili di impatto associate alla traiettoria nominale costituisce il corridoio di volo della missione che dovrà essere tenuto in conto nell'analisi di rischio precedentemente descritta, in quanto esso rappresenta l'area totale di esposizione della popolazione a terra al rischio costituito dall'operazione di volo.



7 Le tecniche di modelling & simulation

7.1 A supporto della valutazione del rischio e della capacità di radar tracking

In questo paragrafo si fornisce una descrizione delle possibilità di supporto, offerte dai *tool* di *Modelling&Simulation (M&S)* dell'Aeronautica Militare, disponibili presso il Reparto Sperimentale Volo – Gruppo Ingegneria per l'Aero-Spazio, alle valutazioni dei rischi derivanti dalle attività di volo di veicoli aerospaziali (c.d. spaziplani). In particolare, vengono illustrate le potenzialità di simulazione nella generazione dei *debris* e dei radar di controllo dello spazio aereo e di difesa aerea che potrebbero essere impiegati nel *tracking* di spaziplani nel corso di una missione di volo.

7.2 Cenni teorici

In termini generali, un rischio consiste nella potenzialità che un certo evento, percepito più o meno grave, accada. Pertanto, come descritto al Paragrafo 4, nel concetto di rischio sono incluse due informazioni molto importanti: la probabilità di accadimento e il livello di gravità dell'evento specifico. Il rischio che si intende studiare va inteso quindi come il prodotto di due tipologie di fattori: la probabilità di accadimento di un certo evento e l'intensità dell'evento pericoloso, cioè – nel caso in esame – il numero di *casualty*. In termini matematici:

$$R_C = P_C \cdot N_C$$

dove:

P_C = probabilità che lo spaziplano o parti di esso cadano al suolo in maniera incontrollata (evento catastrofico);

N_C = numero di persone colpite al suolo¹⁵ (*casualty*) a seguito del verificarsi dell'evento catastrofico di probabilità P_C .

Per il calcolo di N_C occorre conoscere quale sia *l'area a terra potenzialmente esposta al rischio* di caduta incontrollata dello spaziplano o di sue parti a seguito di un vento catastrofico di probabilità P_C ; tale area è indicata come *l'area probabile di impatto a terra (A)* dello spaziplano o di sue parti e dovrà essere caratterizzata in termini di densità di popolazione per poter stimare in numero atteso di persone a terra potenzialmente colpite, in

¹⁵ Si assume conservativamente che ogni persona colpita subisca una *casualty* ovvero, in altri termini, che la probabilità che una persona colpita subisca una *casualty* sia uguale ad 1.



funzione dell'area letale (*footprint*) dello spaziosplano o dei suoi detriti. Di questo si è parlato diffusamente alla fine del Paragrafo 6. Il presente paragrafo descrive invece come i *tool* di simulazione possono essere impiegati nella stima dell'area probabile di impatto (A) dello spaziosplano o delle sue parti (*debris*).

7.3 Attività di simulazione sviluppate mediante i *tool* di *modeling & simulation*

L'AM dispone di un sistema di *modeling & simulation* basato su differenti piattaforme *software* dialoganti, in parte sviluppate *in house*, che nel complesso costituiscono l'infrastruttura denominata *Integrated Test Bed* (ITB) presso il Gruppo Ingegneria per l'Aero-Spazio del Reparto Sperimentale Volo.

7.4 Simulazione di ricaduta dei *debris* associata a un volo suborbitale

Il simulatore di volo aero-spaziale è basato sulla fisica newtoniana e consente la simulazione di ogni tipo di velivolo e veicolo aerospaziale. I voli nell'atmosfera e nello spazio, il movimento dei pianeti e l'effetto gravitazionale sono accuratamente calcolati. Il motore fisico utilizzato all'interno del codice sorgente utilizza algoritmi di integrazione degli stati lineari e angolari (Metodo Runge – Kutta [26] e integratori simpletici di ordine 8). Al fine di risolvere le equazioni differenziali ordinarie è possibile anche usare il più semplice metodo di Eulero, purché vengano impostati *step* di integrazione abbastanza piccoli, aumentando le *performance* di calcolo e riducendo l'errore rispetto al più complesso Metodo di Runge Kutta di 8° ordine. Il modello atmosferico implementato nel *tool* in argomento è il Modello Jacchia-71 [27], ma è possibile anche utilizzare altri modelli tra cui il modello NRLMSISE-00 [28].

Gli strumenti disponibili permettono, nel breve termine, di simulare, al verificarsi di un evento catastrofico (come la perdita di controllo del veicolo o perdita in volo di sue parti), la cui natura dipende ovviamente dalle caratteristiche del mezzo in esame, la generazione del *debris*, la dinamica del volo dei singoli *debris* fino all'impatto al suolo, la stima delle aree probabili di impatto, secondo le modalità di seguito dettagliate:

1. *La generazione dei debris*. Secondo il punto di vista assunto e riferendosi al *Bow-Tie Model* (rif. Para. 6), tale evento costituisce l'anello che congiunge la sequenza degli eventi dalle *root cause* fino al verificarsi dell'*hazard* (perdita di controllo dello spaziosplano o perdita di sue parti in volo) e la successiva sequenza degli eventi fino al potenziale coinvolgimento dei terzi sorvolati (*accident*); in particolare, la sequenza degli eventi che precede contribuisce alla stima del fattore P_C ; questa stima può ottenersi attraverso due possibili metodologie: statistica o simulazione. La prima va esclusa (almeno in una prima fase), in quanto ad oggi non si dispone di statistiche in merito ad incidenti di spaziosplani (con l'eccezione di quelle relative allo *space shuttle*, ma troppo



esigue e comunque di dubbia applicabilità al caso in esame). Per quanto attiene alla seconda metodologia, questa presenta notevoli difficoltà. Nel breve termine, pertanto, è possibile simulare una generazione di *debris* svincolata dagli eventi che la possono precedere, partendo dalla modellazione del veicolo aerospaziale (e.g. Lynx Mark II della XCOR), attraverso i modelli aerodinamici implementati tramite un simulatore di volo. Questa modellazione permette di definire in ambiente simulativo i parametri, i coefficienti e le derivate di stabilità descrittivi del comportamento dinamico e aerodinamico del veicolo aerospaziale. A partire da tale modello di veicolo aerospaziale, è possibile modellare una “nube” di *debris*, attraverso un certo numero n di oggetti corredati del medesimo set di parametri, coefficienti e derivate di stabilità dell’oggetto veicolo aerospaziale, ereditati in parte da quest’ultimo. Il caso più semplice consta nella modellazione di oggetti-*debris* di forma sferica, a massa uniforme compresa in un determinato *range* di valori assegnato; sono quindi noti, per ciascun oggetto-*debris*, massa, forma, volume e quindi coefficiente di resistenza aerodinamica, coefficiente di portanza aerodinamica, densità, matrice di inerzia. Per determinare le condizioni iniziali del moto, invece, si può ipotizzare di attribuire a ciascun oggetto-*debris* la velocità dell’oggetto veicolo aerospaziale al momento della frammentazione, oppure quest’ultima sommata ad un vettore velocità centrifuga/radiale che simula gli effetti di una esplosione.

2. La dinamica del volo dei singoli *debris* fino all’impatto al suolo: il suo calcolo è affidato al *tool* di simulazione. In particolare, le integrazioni delle equazioni del moto dei *debris* vengono effettuate dal motore fisico del *Core* di tale *tool*, a partire dalle condizioni iniziali impostate o calcolate al precedente punto, nonché da condizioni al contorno impostabili, come ad esempio alcune condizioni meteorologiche rilevanti per la determinazione del moto (e.g. *cross-wind*). Le condizioni iniziali potranno tener conto dell’assetto dello spaziotano, del suo vettore velocità all’istante dell’esplosione e della sua quota relativa.
3. La stima delle aree probabili di impatto: in linea teorica deriva dallo studio dell’interazione tra il *debris* con il suolo e gli eventuali manufatti presenti. Pertanto, sarebbe necessario conoscere la morfologia del suolo, la geologia superficiale, i manufatti dislocati sulla superficie terrestre, la loro geometria e struttura, oltre alle caratteristiche geometriche, inerziali e strutturali del *debris* stesso. Nella pratica, applicando una prima approssimazione, si è già provveduto ad implementare un modello simulativo semplificato, basato sull’ipotesi di urti perfettamente anelastici di *debris* sferico e omogeneo su terreno (modello “impatto da asteroide”); tale *debris* impatta il suolo con parametri dinamici in *output* dal precedente punto 2. Specificatamente il software sviluppato *ad hoc* provvede a:
 - a) implementare la possibilità di ricevere dal *tool* il set di dati relativi a ciascun oggetto-*debris*, composto dalle proprietà geometriche, inerziali, cinetiche e dalle coordinate geo-referenziate del punto di impatto sulla superficie terrestre;



- b) implementare l'algoritmo di calcolo che, in funzione dei dati in input precedentemente acquisiti, calcola l'energia cinetica di impatto, diametro cratere prodotto, volume di terra espulsa;
- c) visualizzare i crateri di impatto¹⁶ sulle mappe importate da *Google Earth*.

Infine, è possibile stimare l'area probabile di impatto complessiva, che include tutte le areole che corrispondono a ciascun cratere di impatto.

A scopo dimostrativo, sono state simulate tre frammentazioni (Figure 7-1, 7-2, 7-3), ciascuna in tre differenti punti della traiettoria di volo di una missione tipizzata del Lynx Mark II della XCOR, supponendo che lo spaziorporto di partenza sia l'aeroporto di Grazzanise (CE):

- a) Una prima frammentazione appena successiva al decollo, dunque nei pressi dell'aeroporto, ad una velocità di circa 100 nodi e ad una quota di 400 m;
- b) Una seconda frammentazione ad una velocità di circa 400 nodi e ad una quota di circa 6 km, in allontanamento dall'aeroporto (cioè, al momento in cui viene impostata la massima spinta dei motori);
- c) Una terza frammentazione ad una velocità di circa 1800 nodi e ad una quota di circa 52 km (cioè, al *burn-out*, quando inizia la fase di *coasting*).

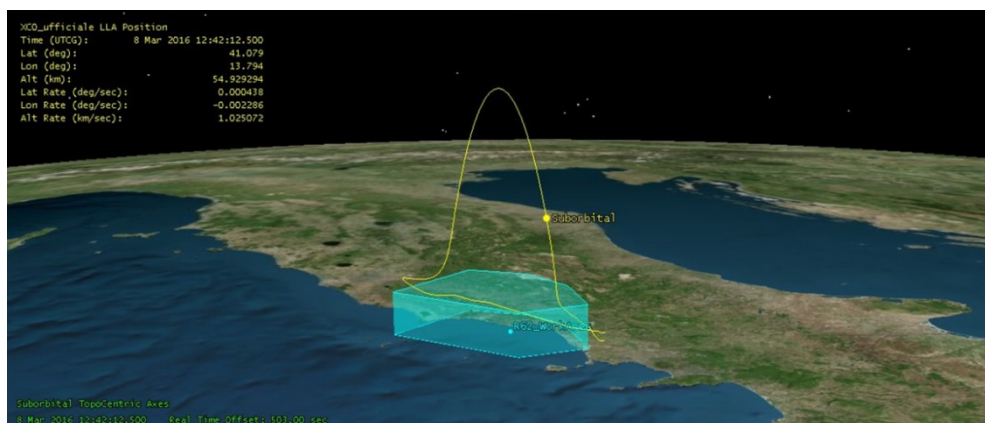


Figura 7-1. Profilo di missione tipo operata dalla base aerea di Grazzanise (CE)

¹⁶ La superficie del cratere di impatto è correlata all'area letale del *debris*; quest'ultima tuttavia potrebbe anche essere più estesa del cratere di impatto, ad esempio a causa dell'effetto di una eventuale esplosione a terra del *debris* che potrebbe propagare un'onda di sovrappressione a livelli pericolosi anche il cratere formato dall'impatto diretto del *debris* con il suolo.

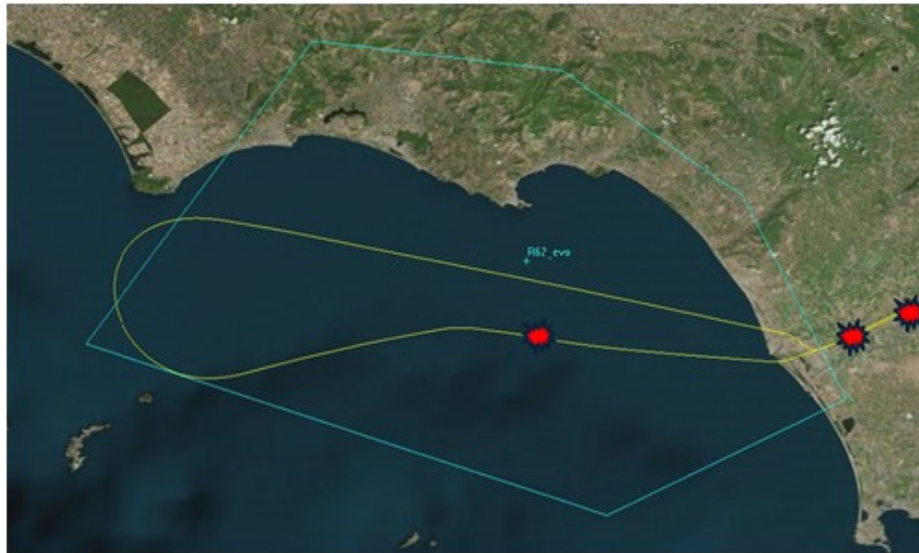


Figura 7-2. Simulazione di scenari catastrofici di riferimento.

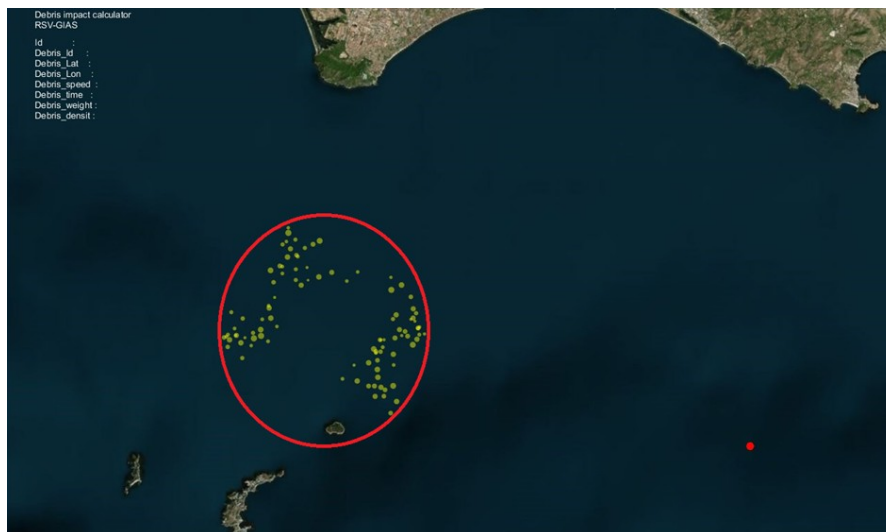


Figura 7-3. Simulazione di areole di impatto al suolo (giallo) e stima dell'area di probabile impatto al suolo (rosso) - Caso relativo alla terza frammentazione ipotizzata.

7.5 Simulazione di dispositivi radar di *tracking* a supporto di un volo suborbitale

Tra i *tool* che compongono l'ITB, vi sono simulatori radar sia di tipo *software-in-the-loop* che *hardware-in-the-loop*. Tali simulatori consentono di modellare radar reali di controllo



dello spazio aereo e di difesa aerea; è possibile, inoltre, modellare radar fittizi, selezionandone i parametri a seconda delle specifiche esigenze.

La possibilità di ricorrere al modellamento di radar può costituire un elemento importante per completare lo scenario di simulazione, riproducendo, in tale ambiente, una capacità che nella realtà sarebbe resa disponibile per il *tracking* delle missioni di volo di uno spaziosplano. Tale capacità permette non solo il *tracking* dello spaziosplano in condizioni di volo ordinarie (nel *range* di quote tra 0 m e 30.000 m)¹⁷, ma anche, nel caso specifico di un incidente di volo di uno spaziosplano, il *tracking* dei *debris* generati da un incidente di volo, localizzandone la posizione nel tempo.

Ad oggi si è dimostrato di poter trasformare i *debris* prodotti in tracce DIS/HLA [29] per permettere ai simulatori dei radar realmente impiegati, già testati, di visualizzarne le traiettorie nel sopracitato *range* di quote, quantificandone con buona approssimazione il numero e la posizione (a seconda della capacità risolutiva dello specifico modello di radar e a seconda della radar *cross-section* dell'oggetto sottoposto a rilevazione).

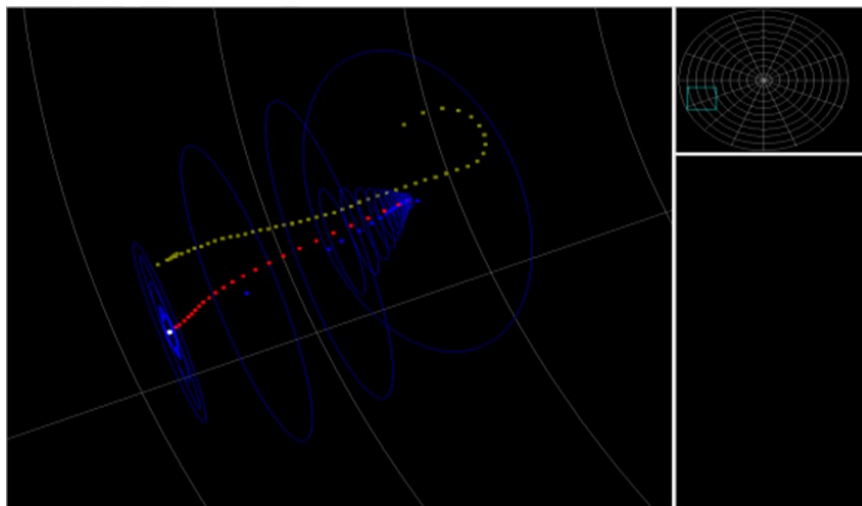


Figura 7-4. Simulazione di tracce radar dello spaziosplano in volo (fase di *turn and glide*)

7.6 Le caratteristiche dei *tool* di M&S disponibili presso il RSV/GIAS dell'AM per potenziali future applicazioni

Le potenzialità degli strumenti sviluppati dall'AM consentono di affinare i modelli e gli scenari simulativi summenzionati, consentendo di pervenire a stime più attendibili dei rischi di *casualty* tra i terzi sorvolati derivanti dalle attività di volo di spaziosplani. In particolare, ripercorrendo i medesimi punti sopra citati:

1. *La generazione del debris:*

¹⁷ Al momento il range del radar è di 30 km, ma con opportune modifiche al software, testate in altri programmi, è possibile arrivare a range spaziali/suborbitali.



- a) Il *tool* consente di implementare una modellazione più articolata del *debris*, con dimensioni, numerosità, forme, matrici di inerzia, condizioni cinematiche e dinamiche iniziali più aderenti ad una potenziale realtà (le parti devono appartenere allo spaziotempo simulato). Al riguardo, è applicabile l'adozione di un modello statistico di distribuzione del *debris* (e.g. mediante Metodo Montecarlo o altro);
 - b) Per quanto attiene alle simulazioni che prevedono una esplosione in volo, è possibile ipotizzare un profilo cinematico iniziale del *debris*, che tenga opportunamente presente l'energia associata all'esplosione, la quale a sua volta può dipendere da altri fattori (e.g. in prima approssimazione dal tempo di volo e, pertanto, dalle quantità di propellente ed ossidante ancora stivate nei serbatoi).
2. *La dinamica del volo dei singoli debris fino all'impatto al suolo.* È possibile implementare determinati modelli meteorologici, allo scopo di verificare come varia l'evoluzione dinamica dei *debris*, al variare delle condizioni meteorologiche.
3. *La stima delle aree probabili di impatto:*
- a) Capacità di trascurare il *debris* che possiede una energia meccanica all'urto con la superficie terrestre non letale (concetto di *debris* "inoffensivo");
 - b) È possibile implementare un modello di dinamica che fornisca una stima più realistica del vettore d'impatto (e.g., considerare che la velocità all'urto ha una componente normale ed una parallela alla superficie terrestre e che pertanto il *debris* può presentare un moto traslatorio all'impatto con il suolo);

E' possibile infine implementare il riconoscimento di aree a differente densità di abitanti (in prima approssimazione, distinguendo tra aree urbane ed aree rurali ed attribuendo una determinata distribuzione di densità di abitanti,) utile alla stima del rischio in termini di numero di *casualties* attese nel corso della missione.

E' in via di sviluppo un *software* che permetta automaticamente la ripetizione di più simulazioni, ipotizzando il verificarsi dei possibili *hazard* a determinati intervalli lungo la traiettoria di volo di una determinata tipologia di missione, al variare di alcune condizioni al contorno (e.g. le condizioni meteorologiche). Questo permetterà nel lungo termine di creare una statistica di missioni simulate e, pertanto, di valutare alcuni parametri simulati, come l'ampiezza del *footprint* al suolo del corridoio di volo (cioè, l'area che include le aree probabili di impatto), necessari a supportare un *risk assessment* per una data tipologia di missione.

Il sistema di simulazione sviluppato implementa modelli non ancora automatizzati e in fase di validazione numerica, in particolare per quanto riguarda la generazione del *debris*



(frammentazione) e l'interazione del *debris* con la superficie terrestre. Tuttavia, sono in via di sviluppo modelli più raffinati, che possono tenere in conto le potenzialità descritte precedentemente, allo scopo di addivenire ad un sistema complessivo che permetta di impostare agevolmente differenti profili di missione, differenti modelli di spaziplani e differenti condizioni al contorno. Tale piattaforma numerica consentirà di reiterare gli scenari di simulazione e generare dei risultati sulla base dei quali operare eventuali valutazioni correlate ai rischi che tali missioni introdurranno sul terzo sorvolato.



8 Spazioporti

8.1 Adeguamento degli attuali aeroporti o realizzazione di nuovi spazioporti?

Da alcuni anni, in particolare dalla dismissione dello Space Shuttle da parte della NASA, si assiste ad emergenti interessi verso nuove iniziative commerciali, quali il turismo spaziale, la ricerca in microgravità di breve durata, i molteplici studi nel settore del volo parabolico oltre la linea di Karman ed il volo punto-punto che consentirebbe il collegamento tra due differenti parti della terra in poche ore, costituendo quello che potrebbe essere definito il trasporto di futura generazione. Ovviamente tutte, queste iniziative devono essere basate sull'esistenza di spazioporti, ossia di basi a Terra dotate delle opportune infrastrutture atte a supportare le operazioni di lancio e rientro di spaziolani o in generale del cosiddetto segmento di volo. In particolare per quanto riguarda il turismo spaziale, il profilo di volo è approssimativamente di tipo parabolico oltre la Linea di Karman e lo spazioporto di partenza coincide con quello di arrivo, mentre nel caso di volo punto-punto gli spazioporti di partenza ed arrivo sono ovviamente differenti (rif. Para. 2). Nel caso del turismo spaziale, la vista fruibile dall'apogeo da 100 Km di altezza si estende ad un orizzonte di circa 1000 Km, quindi per offrire una *home view* ai partecipanti al volo, sarebbe pensabile l'identificazione di spazioporti sparsi sul territorio per supportare un mercato di tipo regionale dove realmente esiste domanda. La realizzazione di spazioporti ex-novo richiede sicuramente notevoli sforzi a vari livelli e con un impegno notevole e molto rischioso di fondi; considerando quindi la possibilità di entrare in mercati di questo genere in modo graduale e minimizzando i relativi rischi, si ritiene che l'approccio più opportuno sia quello di valutare siti già esistenti ed impiegati in normali operazioni aeronautiche. Molte volte infatti le operazioni di uno spazioporto non richiedono almeno in prima approssimazione lo sviluppo di infrastrutture dedicate, ma si può benissimo pensare di partire dalla valutazione di siti già esistenti, esaminandoli dal punto di vista delle operazioni, delle infrastrutture, della sicurezza e della regolamentazione ed andando ad identificare eventuali necessità di adeguamento agli scopi preposti. La posizione geografica del territorio italiano e le sue particolari condizioni climatiche lo rendono particolarmente favorevole allo sviluppo del turismo spaziale e la presenza di vari aeroporti nel paese, molti dei quali in posizione costiera, consente un'ampia selezione da cui partire per effettuare le opportune valutazioni. D'altro canto anche all'estero si tende a seguire un approccio simile. Si consideri ad esempio l'iniziativa legata allo Spaceport Barcellona [30], per la cui realizzazione si pensa di utilizzare l'aeroporto di Lleida Alguaire che venne realizzato dal governo regionale della Catalogna allo scopo di attrarre compagnie aeree *low cost* in quella regione. La realtà dei fatti ha però mostrato come quel sito risulti ampiamente sottoutilizzato ed i soli due voli



charter settimanali non bastano a pagare le spese per le operazioni, per non parlare del recupero dell'investimento iniziale. La trasformazione in spaziorporto sembra aprire ottime opportunità di business per questo sito. Analogamente, in UK sono in corso attività di identificazione di *regional spaceport* ed è stato costituito uno *Steering Committee* con la partecipazione dell'Agenzia Spaziale Britannica, Il Dipartimento Trasporti ed il Ministero della Difesa. Questo gruppo (analogamente a quanto fatto dall'ENAC, rif. Para. 5) ha firmato un *Memorandum of Cooperation* con la FAA-AST per dare il via allo sviluppo di un sistema regolatorio su modello di quello americano da applicare ai voli suborbitali operati da spaziplani riutilizzabili ed a piccoli lanciatori di satelliti, riutilizzabili o non. Questo *UK Commercial Steering Committee* ha annunciato nel 2015 una lista di siti adatti a diventare spaziorporti basati su infrastrutture esistenti e corridoi liberi di uscita verso il mare, trovandosi tali siti in posizione costiera.

8.2 Infrastrutture e logistica. Il problema dello stivaggio del combustibile

Un aspetto di particolare importanza nelle operazioni di uno Spaziorporto riguarda il trattamento dei propellenti ed in particolare il loro stoccaggio. Il sito candidato ad ottenere la licenza di Spaziorporto deve essere dotato di un piano che includa:

- una planimetria in scala che mostri la collocazione all'interno del sito delle infrastrutture per materiali esplosivi e le minime distanze consentite tra dette infrastrutture, la viabilità pubblica ed i limiti perimetrali del sito;
- una lista della massima quantità di propellenti liquidi e solidi, nonché di eventuali materiali esplosivi per ognuna delle infrastrutture di stoccaggio;
- una descrizione delle varie attività previste nelle varie infrastrutture;
- una mappa dettagliata delle infrastrutture contenenti materiale esplosivo.

Le infrastrutture di uno spaziorporto adibite allo stoccaggio di propellenti dovranno essere collocate in una apposita zona, particolarmente sicura, possibilmente collocata in un'area remota dello spaziorporto. E' necessario separare opportunamente le infrastrutture adibite allo stoccaggio dei propellenti al fine di minimizzare il rischio di esplosione; le zone di stoccaggio devono essere opportunamente separate da:

- altre zone che contengono propellenti;
- fabbricati e strutture con presenza di persone, direttamente o indirettamente legate alle operazioni con propellenti;
- strade pubbliche;
- magazzini di stoccaggio combustibili, olii, lubrificanti;



- zone di parcheggio aeroplani o hangar, piste, zone di avvicinamento e *taxiway*;
- zone perimetrali dello spaziorporto;

E' necessario collocare le infrastrutture dello spaziorporto adibite allo stoccaggio di propellenti ad una distanza opportuna da aree pubbliche o strade. La seguente relazione lega la distanza minima d , espressa in piedi (ft), con la massima quantità di propellente immagazzinabile in una determinata infrastruttura (NEW - *Net Explosive Weight*) espressa in libbre:

$$\max NEW [lbs] = \exp\{(d [ft])/389\} + 2.914\}$$

8.3 Requisiti ambientali

La selezione di un sito come candidato alla funzione di spaziorporto viene anche effettuata sulla base di una accurata analisi che riguarda l'impatto ambientale delle attività legate alla presenza dello spaziorporto, in funzione delle normative vigenti¹⁸. Tipicamente questa valutazione riguarda aspetti quali il rumore e le emissioni che possono porre significative limitazioni alle attività a causa di impatti sugli strati di ozono, contaminazione dell'atmosfera dovute a residui di fumi o rilascio di propellenti tossici, per non parlare dell'inquinamento acustico che può avere impatti importanti sulla popolazione. Sarà quindi necessario, a parte il tenere conto di questi aspetti nel progetto dello spaziorporto, orientare la scelta dei possibili spaziorporti a siti ubicati nelle zone costiere. La FAA ha in preparazione un *Programmatic Environmental Impact Statement* (PEIS) per valutare l'impatto ambientale di lanci e rientri di veicoli sperimentali. In Europa, il Programma SESAR si propone ad esempio di ridurre l'impatto ambientale del 10%. Sarà necessario che venga preparato un *Environmental Impact Report* che descriva accuratamente gli impatti sull'inquinamento di acque ed aria, disturbi agli ecosistemi, rumore, traffico ed impatti culturali sulla popolazione. E' anche importante generare un piano di gestione e smaltimento/riciclo rifiuti e materiali tossici che eviti contaminazioni ambientali e possa essere accettato dalle comunità locali e sia in accordo alle normative vigenti. Aspetti da tenere in particolare considerazione nella valutazione di possibili Spaziorporti riguardano il cercare di evitare la prossimità a:

- nidi di uccelli;
- siti storici e culturali;
- aree pubbliche;
- sistemi viari pubblici;
- aree sismiche;

¹⁸ Una esposizione più dettagliata dei requisiti tipicamente previsti per gli spaziorporti è riportata nel documento relativo al WP 5.1. La gestione di uno spaziorporto è invece trattata nel WP 5.2.



- terreni acquitrinosi;
- fauna e specie in pericolo

8.4 Piano di controllo del territorio come misura di mitigazione del rischio

Uno spaziorporto con le sue infrastrutture ed operazioni è inserito all'interno del territorio nel quale si trova ed interfaccia in diversi modi con le comunità circostanti. La presenza di uno Spaziorporto dovrà pertanto richiedere una attenta valutazione dei rischi associati con le relative attività al fine di attuare una adeguata politica per la protezione dell'ambiente e del territorio. Ad esempio, la presenza sul territorio di spaziorporti ed infrastrutture associate, che utilizzano o detengono sostanze chimiche (come propellenti, esplosivi) per le loro attività, può esporre a rischi la popolazione ed il territorio. Ad esempio, nel caso di rilascio accidentale nell'atmosfera di sostanze tossiche in caso di esposizione, gli effetti sulla salute umana variano a seconda delle caratteristiche delle sostanze, della loro concentrazione, della durata d'esposizione e dalla dose assorbita. Gli effetti sul territorio conseguenti a tale rilascio sono legati alla contaminazione del suolo, dell'acqua e dell'atmosfera da parte delle sostanze tossiche. Una piena conoscenza di questi aspetti è la premessa indispensabile per ridurre il rischio ai livelli più bassi possibili, ed è pertanto necessario un intenso coordinamento con i governi regionali e le autonomie locali per garantire la tutela delle persone e la salvaguardia del territorio. L'attività di mitigazione deve mirare pertanto, con il supporto dei soggetti competenti, a valutare i vari scenari di rischio inerenti alle attività dello spaziorporto e preannunciare, monitorare, sorvegliare e vigilare gli eventi e i livelli di rischio attesi. Allertamento, pianificazione, formazione, diffusione della informazione alla popolazione, esercitazioni e applicazione della normativa tecnica sono i principali strumenti di protezione per la prevenzione dei rischi sul territorio e hanno l'obiettivo di evitare o limitare i danni in caso di emergenza. Gli effetti di un incidente legato alle attività di uno Spaziorporto possono essere mitigati dall'attuazione di piani di emergenza adeguati, sia interni sia esterni. Questi ultimi prevedono misure di auto-protezione e comportamenti da fare adottare alla popolazione. Sarà poi necessario il coinvolgimento della protezione civile che dovrà in qualche modo monitorare le attività dello Spaziorporto attraverso opportune modalità di informazione e comunicazione. Nei piani di emergenza devono essere indicate le zone a rischio, gli allarmi, e i comportamenti da adottare da parte della popolazione in caso di incidente legato alle attività dello spaziorporto. In particolare dovrà essere effettuata una mappatura del territorio individuando le zone di massima esposizione, cioè quelle ubicate nelle immediate vicinanze dello spaziorporto dove gli effetti di un incidente possono risultare più gravi, le zone di danno dove le conseguenze di un incidente sono ancora gravi, in particolare per alcune categorie a rischio e le zone di attenzione, più esterne all'incidente, interessate da effetti in genere meno gravi.



8.5 Collocazione geografica e integrazione con la rete globale dei trasporti

La collocazione geografica di uno spaziorporto non può prescindere dalla sua integrazione nell'ambito di un adeguato sistema di trasporti; questo include strade e autostrade di accesso, porti, ferrovie che risultano componenti essenziali per le operazioni ed il futuro sviluppo dello spaziorporto. Nel caso in cui si debba considerare un sito specifico che possa assolvere alla funzione di spaziorporto è da valutare l'adeguatezza delle vie ed infrastrutture di accesso al sito attualmente esistenti, in funzione delle future richieste del mercato. Inoltre, nell'ipotesi dell'esistenza in futuro di più spaziorporti, dovranno essere esaminati gli specifici collegamenti intermodali già durante le fasi di pianificazione e sviluppo degli spaziorporti. Inoltre, un aspetto di importanza rilevante è costituito dal rischio associato ad un eventuale incidente che risulti nello spargimento di frammenti in zone attraversate da veicoli di trasporto in superficie o da persone. Negli USA ad esempio, la FAA ha definito la cosiddetta *Overflight Exclusion Zone* (OEZ) di ampiezza cinque miglia; oltre alla OEZ, l'operatore dello spaziorporto dovrà dimostrare per analisi che al di fuori della OEZ il livello di rischio medio per i terzi al suolo (non coinvolti nelle operazioni) associato a questa tipologia di incidenti è inferiore a $3 \cdot 10^{-5}$ *casualty* per missione¹⁹ (rif. Para. 4).

8.6 L'utilizzo di strutture militari per voli civili

Assumendo che la costituzione di uno spaziorporto debba partire dalla valutazione di siti già esistenti, e' abbastanza naturale rivolgere l'attenzione ad aeroporti militari attualmente operativi in quanto è più alta la probabilità che soddisfino molti dei requisiti di uno spaziorporto e che siano dotati di infrastrutture adeguate; ad esempio la lunghezza della pista (3000 m, 9800 ft), e la possibilità di utilizzare più agevolmente spazi aerei segregati. Ovviamente, un aeroporto militare sembra prestarsi maggiormente allo scopo in quanto non vi operano linee aeree commerciali con voli programmati. Inoltre gli aeroporti militari sono di solito ubicati in zone lontane da aree densamente popolate e si trovano in posizioni costiere. Occorre anche considerare l'innegabile dimensione militare associata ai voli ipersonici/suborbitali. E' quindi ragionevole ritenere che la nascita di uno spaziorporto in Italia possa considerare come punto di partenza un aeroporto militare, almeno nelle fasi sperimentali dei voli di spaziorpiani. E' però anche vero che la nascita e lo sviluppo di un mercato legato al turismo spaziale o sperimentazione in microgravità possa richiedere investimenti nell'implementazione di infrastrutture addizionali che potrebbero essere necessarie in momenti successivi o addirittura richiedere la realizzazione di nuovi e più moderni siti. Si consideri ad esempio il caso di SpaceX che ha finora utilizzato gli spaziorporti militari e quelli gestiti dalla NASA ma a fronte di nuove esigenze di automazione a confronto dell'utilizzo di strutture pensate decenni or sono e costruite per

¹⁹ La normativa statunitense richiede che tale obiettivo di sicurezza sia dimostrato sia dall'operatore che opera uno specifico spaziorpiano sia dall'operatore dello spaziorporto sul quale devono operare una o più tipologie di spaziorpiani.



esigenze molto diverse, si sta orientandosi verso la realizzazione di un nuovo modernissimo spaziorporto nel Sud Texas.

9 Problemi aeromedici del volo suborbitale

Il nuovo settore del volo suborbitale consentirà di incrementare enormemente le opportunità di volo disponibili, sia per il grande pubblico sia per i ricercatori, i quali potranno approfondire la comprensione dei complessi fenomeni di adattamento umano all'ambiente spaziale e trasferire le conoscenze acquisite a beneficio del comune cittadino. Tutto questo in un ambiente straordinario perché privo della variabile che, più di ogni altra, ha condizionato l'evoluzione della specie umana sulla Terra: la gravità.

E' verosimile pensare che la breve o brevissima permanenza in microgravità degli equipaggi e dei passeggeri dei futuri voli suborbitali non sarà sufficiente a innescare quei fenomeni di adattamento tipici delle missioni orbitali di lunga durata, noti come *space adaptation syndrome* e caratterizzati, tra le altre, da modificazioni cardiovascolari, muscolo-scheletriche e neuro vestibolari. Allo stesso tempo, tuttavia, potrebbe provocare reazioni psico-fisiche al momento non prevedibili, per cui sarà opportuno regolare l'accesso a questo nuovo dominio anche dal punto di vista medico, così come già è in uso per i voli orbitali.

Compito degli specialisti di medicina aerospaziale sarà quello di sviluppare adeguati protocolli di selezione e sorveglianza per gli equipaggi professionali destinati al volo suborbitale, più breve rispetto alle missioni orbitali attualmente in corso, ma che verosimilmente verrà effettuato con una frequenza ripetuta e ravvicinata nel tempo. Dall'altra parte, per i passeggeri candidati a un volo che combinerà gli effetti del volo atmosferico a quelli di un, seppur breve, volo spaziale, si dovranno stabilire i criteri di ammissione e i limiti accettabili di rischio di eventi medici nel corso della missione. Il medico del volo spaziale (*Space Flight Surgeon*), figura professionale che immaginiamo unisca in sé le competenze del medico del volo aerospaziale e del Medico di Stormo militare, si troverà nella condizione di dover decidere sulla possibilità che possano volare persone anziane, con malattie croniche, sottoposti a terapie farmacologiche eppure determinati a vivere, magari per una sola volta, un'esperienza unica nella loro esistenza. Per i passeggeri spaziali il *Flight Surgeon* sarà quindi chiamato ad assumere il ruolo di *Safety Manager*, adottando criteri pragmatici di *risk assessment* piuttosto che seguire rigidi standard di selezione, a supporto della possibilità che astronauti non professionisti possano volare nello spazio con un accettabile riduzione del rischio medico, anche attraverso la cura preventiva delle patologie più gravi.

Dall'inizio dell'esplorazione umana dello spazio, le più importanti Agenzie si sono occupate di sviluppare e aggiornare i criteri di selezione e certificazione degli astronauti, focalizzati sempre, tuttavia, sul volo orbitale. Sempre riguardo il volo orbitale, anche gli astronauti non professionisti sono stati inclusi tra coloro che dovevano soddisfare specifici requisiti; si



richiama, a tale proposito, la Class IV sviluppata per gli *Space Flight Passenger* dei voli Shuttle e il Volume C del *Medical Evaluation Document* sviluppato per la *International Space Station*. In futuro, se l'esigenza delle imprese commerciali sarà quella di trarre profitto facendo volare il maggior numero possibile di passeggeri nel nuovo dominio dell'aerospazio, le Agenzie istituzionali avranno, invece, il compito di governare questo settore senza porre eccessivi limiti di carattere medico alle necessità dell'impresa, fermo restando le imprescindibili esigenze di sicurezza. La FAA, successivamente al *Commercial Space Launch Amendment Act* del 2004, e con uno sguardo rivolto al nuovo settore del volo suborbitale, ha pubblicato nel 2006 il regolamento "*Human Space Flight Requirements for Crew and Space Flight Participants*" non imponendo rigidi criteri di selezione o standard medici per i passeggeri dei voli spaziali, piuttosto limitandosi a consigliare uno screening medico sotto forma di linee guida tenendo conto che i passeggeri non avranno ruoli specifici a bordo dei vettori e, nel caso dei voli suborbitali, saranno esposti molto brevemente alla microgravità. Questo regolamento, che distingue tra volo orbitale e suborbitale, è tuttora in vigore e prevede l'obbligo per le Compagnie (e quindi per il *Flight Surgeon* da queste dipendente), di informare gli equipaggi (quindi gli astronauti professionisti) dei rischi del volo suborbitale e di assicurarsi che possano sostenere gli stress dell'attività spaziale. Per i piloti professionisti, è richiesta una certificazione medica FAA *Class II*, certificazione che non è attualmente prevista per i passeggeri i quali, pertanto, non devono superare nessuna selezione di tipo psico-fisico ma devono obbligatoriamente prestare il loro consenso informato alla Compagnia, che deve renderli consapevoli dei rischi che comporta questo tipo di volo. FAA ha annunciato di voler proporre, al momento, l'innalzamento del livello di certificazione richiesta agli equipaggi professionali a *Class I* e ha sponsorizzato una serie di conferenze tra esperti del settore per stabilire eventuali altri correttivi, focalizzando l'attenzione sulla corretta definizione delle figure che, all'interno degli equipaggi di volo, assumeranno un ruolo critico per la sicurezza. Già nel 2002 un'apposita *Space Passenger Task Force* organizzata dall'*Aerospace Medical Association*, ha pubblicato un articolo a carattere di "*position paper*" sull'idoneità medica al volo commerciale suborbitale per i futuri passeggeri. In particolare, per il volo suborbitale, non si davano indicazioni su specifici protocolli di visita e di selezione, ma si suggeriva di partire da alcuni "assunti" riferibili a questa tipologia di volo per guidare i criteri di ammissione da parte del *Flight Surgeon*: velivoli piccoli e con spazi confinati, volo di breve durata - da 1 a 3 ore - con brevi esposizioni alla microgravità, cabina pressurizzata con quote simili al livello del mare, brevi periodi di accelerazioni sostenute nel range di 2-4 +Gz o +Gx a seconda del velivolo utilizzato, differenti procedure per l'evacuazione di emergenza. Tra l'altro, la difficoltà di stabilire specifiche linee guida applicabili ad ogni profilo è data anche dalle diverse potenziali piattaforme di volo, che spaziano da velivoli che verranno lanciati come veri e propri razzi e altri che potranno effettuare decollo e atterraggio orizzontale, con stress fisici molto differenti a carico degli occupanti. Per gli assunti di cui sopra, in generale i passeggeri non dovrebbero essere portatori di deformità che impediscano l'uso degli equipaggiamenti di emergenza, dovrebbero partecipare ad un addestramento prevolo per verificare almeno la



tolleranza allo stress accelerativo e il *Flight Surgeon* dovrebbe escludere quelle condizioni di rischio foriere di possibili eventi medici in volo (ad esempio, un'angina instabile o uno scompenso cardiaco congestizio) e approfondire con attenzione altre condizioni a rischio come, ad esempio, lo stato di gravidanza.

Per approfondire le conoscenze che aiuteranno gli operatori del settore a fronteggiare la sfida del volo spaziale commerciale la FAA ha, recentemente, costituito il *Center of Excellence for Commercial Space Transportation (CoE CST)* che, nel 2012, ha pubblicato un documento che contiene linee guida in tema di standard per gli equipaggi di volo e raccomandazioni per i futuri passeggeri, così come ha fatto la *International Association for the Advancement of Space Safety (IAASS)* che, nel maggio 2014, ha pubblicato un report sui requisiti medici e sul training per piloti e partecipanti a voli spaziali commerciali raccomandando, per i primi, almeno una certificazione *Class I FAA* e, per i secondi, pratiche linee guida per l'ammissione al volo basate su un certificato di buona salute del medico curante e una più approfondita visita da parte dello *Space Flight Surgeon*. Interessante da sottolineare che il report fissa, sia per i piloti sia per i passeggeri, specifici limiti per le dosi di radiazioni assorbite, pensate per gli equipaggi ma anche per i futuri "frequent flyers" di voli suborbitali.

Con queste premesse sarà fondamentale, in futuro, proprio il ruolo dello *Space Flight Surgeon*, il quale agirà come *Risk Manager* aeromedico per conto della Compagnia privata/Ente istituzionale, all'interno di un programma strutturato di *Safety Management System*, per definire il rischio medico legato a quel particolare profilo di missione, sia per i piloti sia per i passeggeri, e rilasciare la clearance aeromedica per il volo. Il tutto sotto la supervisione dell'Autorità nazionale (*Licensing Authority*) il cui *Chief Medical Officer* agirà come un "accountable executive", responsabile per la sicurezza aeromedica nel settore aerospaziale a livello nazionale. Per assolvere adeguatamente questo compito, così come stabilito dall'ICAO, queste figure professionali dovranno avvalersi di un sistema consolidato di raccolta dei dati relativamente agli eventi medici occorsi in volo e di quelli occorsi tra un volo e l'altro (in particolare per gli equipaggi professionali) nonché delle informazioni che proverranno dall'anamnesi dei candidati e dai risultati delle visite mediche. L'analisi degli eventi e la creazione di un database medico dedicato, potrebbero consentire di consolidare un processo condiviso di "decision making" per definire il rischio accettabile di incapacitazione in volo che, se oggi per i piloti professionisti del settore civile è comunemente accettato che debba attestarsi al di sotto dell'1% per anno, lo stesso rischio accettabile dovrà essere definito sia per gli equipaggi dei voli suborbitali sia per i passeggeri, soprattutto nelle fasi iniziali di avvio del settore, in cui i voli saranno ancora etichettati come "sperimentali".

Per definire il rischio medico di un volo orbitale, oggi ci si avvale delle conoscenze scientifiche e delle pratiche cliniche ormai consolidate, anche se non definitive, dopo circa 50 anni di esplorazione umana dello spazio, in alcuni casi anche con periodi di permanenza in microgravità di lunga o lunghissima durata. Si dovrà necessariamente partire da queste



basi di conoscenza anche nell'approccio al futuro volo commerciale suborbitale di cui ancora poco si sa in termini di effetti sull'organismo, specialmente se parliamo di passeggeri non professionisti nei quali questo particolare tipo di volo potrebbe esacerbare sottostanti patologie. Sempre FAA ha avviato delle collaborazioni con compagnie private dedite all'addestramento biomedico, per avviare degli studi scientifici volti ad analizzare la tolleranza al volo spaziale di soggetti con patologie croniche. L'addestramento aerofisiologico (volo parabolico, centrifuga, camera ipobarica, simulatore, etc.), oltre a costituire un punto fermo nel percorso addestrativo degli equipaggi professionali (così come lo è oggi per gli equipaggi militari), potrà essere un elemento fondamentale, insieme allo screening ed alla eventuale cura delle principali patologie potenzialmente disqualificanti, nel percorso di avvicinamento al volo dei passeggeri, anche al fine di minimizzare eventuali questioni di natura assicurativa e medico-legale, finora non completamente chiarite nei vari documenti regolatori finora pubblicati. A questo proposito vale la pena considerare l'esperienza dei primi turisti spaziali che hanno volato a bordo della Stazione Spaziale Internazionale e che, in alcuni casi, sono stati ammessi al volo anche grazie a questo specifico percorso addestrativo che ha dimostrato a terra la loro capacità di poter affrontare i principali problemi fisiologici del volo spaziale.

Infine, dal punto di vista dell'assistenza sanitaria e date le caratteristiche delle possibili piattaforme degli spaziplani, è verosimile che in un volo suborbitale possa non esserci assistenza medica a bordo, se non richiesta, anche perché potrebbe non essere nemmeno prevista la figura dell'assistente di volo. Le compagnie potrebbero prevedere la presenza di un kit di primo soccorso a bordo e un addestramento specifico per l'equipaggio ma, per tutte queste ragioni, la prevenzione primaria e il risk assessment prevolo da parte dello Space Flight Surgeon assumeranno ancor più una fondamentale importanza. Particolare attenzione, infine, si dovrà porre nell'attrezzare adeguatamente le dotazioni sanitarie degli spazioporti, tenendo conto che questi, per le ragioni già elencate, si troveranno in contesti isolati e prevedibilmente lontani da strutture sanitarie provviste di livelli di cura avanzati.

Per la bibliografia si rimanda ai riferimenti da [34] a [46].



10 Aspetti da approfondire, soluzioni da individuare

Di seguito si riporta un elenco di ulteriori aspetti da approfondire e sviluppare nel dettaglio per poter costruire un quadro regolamentare minimo che possa consentire l'effettuazione di voli suborbitali dal territorio italiano secondo gli obiettivi posti dalla *road map* regolamentare descritta la Para. 5.

- Analisi del quadro giuridico europeo e nazionale; individuazione di possibili ambiti applicativi delle attuali leggi e regolamenti e possibili evoluzioni adattative (Regolamenti Europei, Codice della Navigazione, Regolamenti ENAC).
- Il coordinamento tra gli enti istituzionali: ENAC, ASI, ANSV, ENAV, AMI, Enti Locali, Enti Gestori dello Spazioporto.
- La validazione delle licenze FAA per gli spaziplani e gli spazioporti. Accordi bilaterali. Il problema dell'ITAR e il *dual use*.
- Licenze per i membri dell'equipaggio.
- Garantire la sicurezza: aeronavigabilità, operazioni e aspetti autorizzativi. *Safety Management System* (SMS). Standard di progettazione per il velivolo. La sicurezza per gli occupanti.
- Aspetti ATM/ATC e la gestione del rischio per gli utilizzatori dello spazio aereo:
 - classificazione dello spazio aereo;
 - spazio aereo controllato e spazio aereo segregato;
 - criteri di gestione del traffico e dello spazio aereo: segregazione totale; segregazione dinamica; gestione delle operazioni di condizioni di emergenza; integrazione completa con il traffico aereo; traiettorie e profili di missione;
 - il *tracking* della traiettoria dall'uscita dello spazio aereo controllato al rientro nello spazio aereo controllato²⁰;
 - il problema dei *debris* in caso di esplosione in volo; simulazione in tempo reale della evoluzione della nuvola di detriti²¹;

²⁰ Si veda a tale proposito quanto esposto al Para. 7

²¹ Cfr. nota 24



- procedure ATM di *contingency*;
- Interferenza con le operazioni spaziali.
- Requisiti per le organizzazioni di progetto, produzione, manutenzione, operazioni, di gestione dello spazioporto. Riconoscimento delle capacità, privilegi e responsabilità, sorveglianza.
- Inconvenienti e incidenti. Raccolta ed elaborazione dei dati e svolgimento delle indagini.
- Specifici aspetti giuridici e assicurativi:
 - partecipanti a bordo di voli sperimentali;
 - il problema del consenso informato;
 - assicurare persone e cose a terra, nello spazio aereo e nello spazio esterno;
 - assicurare gli occupanti;
 - assicurare lo spaziolano e il *payload*;
 - responsabilità dello Stato e responsabilità dell'operatore.
- Requisiti ambientali. Emissioni inquinanti e rumore. il problema del *boom* sonico.

11 Conclusioni

Il presente lavoro ha tentato di delineare il quadro delle principali problematiche da affrontare per la costruzione di un quadro regolamentare nazionale flessibile, armonizzato quanto più possibile a livello internazionale, che possa consentire – già a partire dal breve periodo – l'effettuazione di operazioni suborbitali dal territorio e nello spazio aereo italiano. E' stato messo in evidenza lo stato delle attività in corso e lo sforzo che le istituzioni preposte alla regolamentazione, prime fra tutte l'ENAC, in cooperazione con altri soggetti istituzionali, accademici e industriali, stanno portando avanti in questo settore. Il lavoro è appena iniziato e molti ancora sono i temi e gli aspetti di dettaglio da approfondire e risolvere per giungere alla creazione di un quadro normativo efficace che possa consentire alle industrie e agli operatori attivi nel settore del volo suborbitale e ipersonico, inclusi quelli internazionali, di poter investire ed operare in Italia. L'importante è – come sempre – tracciare la rotta e iniziare al più presto la navigazione.



12 Riferimenti e bibliografia

- [1] ICAO Annex 8 to the Convention on International Civil Aviation, Airworthiness of Aircraft, Eleventh Edition, July 2010
- [2] Enciclopedia Italiana Treccani, Appendice IX, 2015, voce *Turismo spaziale*
- [3] D. Webber, *Point-to-Point Sub-orbital Space Tourism: Some Initial Considerations*, 1st IAA Symposium on Private Manned Access to Space, Arcachon, 28-30 May 2008
- [4] Reentry Vehicles: Spheres vs. Blunt Bodies <http://www.hq.nasa.gov/pao/History/SP-4209/ch3-4.htm>
- [5] Ruwantissa Abeyratne, *Regulation of Commercial Space Transport – The Astrocizing of ICAO*, Springer, 2015
- [6] ENAC, *A Regulatory Policy for the Prospective Commercial Space Transportation Certification and Operations in Italy*, Draft 1 - March 2015
- [7] G. Catalano Sgrosso, *Regolamentazione dei voli suborbitali*, Presentazione effettuata al Gruppo di Lavoro Voli Suborbitali del 10 novembre 2015
- [8] J.D. Andrews, T.R. Moss, *Reliability and Risk Assessment*, Second Edition, Professional Engineering Publishing.
- [9] Convention on International Civil Aviation, Chicago (1944), ICAO DOC 7300/9
- [10] UE Commission, *Roadmap for the integration of civil Remotely-Piloted Aircraft Systems into the European Aviation System – Final Report*, June 2013, Annex 3.
- [11] ICAO Safety Report 2014 Edition, Accident Records: 2009–2013 Scheduled Commercial Flights
- [12] US Code of Federal Regulation (CFR), Title 14 Aeronautics and Space, Volume 4, Chapter III, Part 400 to 460; www.faa.gov/regulations_policies/faa_regulations/
- [13] US DOT, FAA AC431.35-1, *Expected Casualty Calculations for Commercial Space Launch and Reentry Missions* (ora sostituito dal *Flight Safety Analysis Handbook*, Version 1.0).
- [14] MoC, Memorandum of Cooperation on Commercial Space Transportation Development, between ENAC and the FAA, March 12, 2014
- [15] ICAO/UNOOSA Space Learning Group, *Space Learning Group - Sub-Group on information text for the global plans, Work Statement*, Ottobre 2015
- [16] Lettera ENAC del 25 agosto 2015, *Istituzione del Gruppo di Lavoro Voli Suborbitali*, Rif. 0089506/VDG



- [17] REGULATION (EC) No 216/2008 of the European Parliament and of the Council of 20 February 2008 on common rules in the field of civil aviation and establishing a European Aviation Safety Agency (noto comunemente come "Basic Regulation")
- [18] IAASS, *Space Safety Standard – Commercial Human-Rated System*, Doc. n. IAASS-ISSB-S-1700-REV-B, March 2010
- [19] FAA, *Recommended Practices for Human Space Flight Occupant Safety*, Version 1.0, 27 August 2014
- [20] FAA, *RLV & Spaceports Workshop*, Introduction and Regulation, Washington DC, 16-17 March 2015
- [21] A.L.C. Roelen, J.G. Verstraeten, L.J.P. Speijker (NLR), S. Bravo Muñoz, J.P. Heckmann (APSYS), L. Save (Deep Blue), T. Longhurst (CAA UK), *Risk models and accident scenarios in the total aviation system*, Ascos Safety Certification, 7th Framework Programme, Version 1.0, 06.01.2014.
- [22] FOCA Switzerland, *Guidance for an Authorisation for Low Level Operation of RPAS* (GALLO)
- [23] IAASS, *Commercial Human Spaceflight Safety Course*, Torino 1-3 dicembre 2014.
- [24] Moss et al., Reliability and Risk Assessment
- [25] G. Di Antonio (ENAC), A. Rapaccini (ENAC), *Metodologia di valutazione del rischio in operazioni RPAS per autorizzazioni e permessi di volo non geografici*, Edizione 1, 10 dicembre 2015.
- [26] F. Saleri, *Appunti preliminari per il corso di Modellistica Matematica per problemi differenziali*.
- [27] M_DARM017/ID20672/2015 del 3 agosto 2015, *Studio di Fattibilità per Trasporto Spaziale Suborbitale*, S-03-14 del Gruppo Ingegneria per l'Aero-Spazio del Reparto Sperimentale Volo.
- [28] J.M. Picone, D.P. Drob, and R.R. Meier - NRLMSISE-00: A New Empirical Model of the Atmosphere
- [29] Distributed Interactive Simulation (DIS) Version 6 - IEEE 1278.1a-1998 e High-Level Architecture (HLA) - IEEE 1516–2010
- [30] IAC-15-D-6.3.4 *Development of International Urban Spaceports*, IAC Congress 2015
- [31] <http://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1022&context=stm>
- [32] http://www.spaceflorida.gov/docs/spaceport-ops/florida-spaceport-systems-plan-2013_final.pdf?sfvrsn=2
- [33] https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/408414/uk-spaceport-government-response.pdf



- [34] Rayman RB, Antunano MJ, Garber MA et al., "Medical Guidelines for Space Passengers", AsMA Task Force on Space Travel. Aviat Space Environ Med, 2001, 72 (10):948-950.
- [35] Rayman RB, Antunano MJ, Garber MA et al., "Medical Guidelines for Space Passengers -II". AsMA Task Force on Space Travel. Aviat Space Environ Med, 2002, 73(11):1132-1134.
- [36] "FAA Humans space flight requirements for crew and space flight participants". Final Rule, 14 CFR Title 14, Chapter III, Subchapter C, Part 460, 2006.
- [37] "Guidance for Medical Screening of Commercial Aerospace Passengers". Federal Aviation Administration, Office of Aerospace Medicine, Washington, D.C. 2006. Technical Report No. DOT-FAA-AM-06-1.
- [38] "Medical Certification for Pilots of Commercial Suborbital Space Flights". AsMA Ad Hoc Committee. Aviat Space Environ Med, 2009, 80(9): 824-826.
- [39] Jennings RT et al. "Medical Qualification of a Commercial Spaceflight Participant: Not Your Average Astronaut." Aviat Space Environ Med, 2006,77(5):475-484.
- [40] "Suborbital Commercial Space Flight Crewmember Medical Issues. Special Report". AsMA Space Flight Working Group. 2010.
- [41] Antunano M. J., Vanderploeg J.M., Jennings R.T., Richard E.E., McDonald P.V., "Commercial Human Space Flight," in "Fundamentals of Aerospace Medicine", Davis J.R. et al., Lippincott Williams & Wilkins ed., 4th edition, 2008.
- [42] "Flight Crew Medical Standards and Spaceflight Participant Medical Acceptance Guidelines for Commercial Space Flight". Centre of Excellence for Commercial Space Transportation, June 30, 2012.
- [43] "The Annual Compendium of Commercial Space Transportation", FAA, ed. February 2014.
- [44] "Guidelines for the safe regulation, design and operation of Suborbital Vehicles - Recommended best practices on Flight Crew and Spaceflight Participant Medical and Training Requirements". International Association for the Advancement of Space Safety (IAASS), IAASS Suborbital Safety Technical Committee Manual, May 2014.
- [45] Torchia F., "Letter to the Editor – Commercial Human Spaceflight". In Italian Journal of Aerospace Medicine, n. 14, July 2015, pp. 3-14.
- [46] ICAO "Manual of Civil Aviation Medicine", third edition, 2012.