



*Università degli Studi di Firenze*

**DOTTORATO DI RICERCA IN**

*"Telematica e Società dell'Informazione"*

CICLO XXV

**Coordinatore**  
Prof. Dino Giuli

“L’integrazione di Unmanned Aircraft System negli spazi aerei:  
il potenziale tecnologico e l’impatto socio-tecnico”

Settore Scientifico Disciplinare ING-INF/05

**Dottorando**  
Dott. Taurino Damiano

**Tutore**  
Prof.ssa Marti Patrizia

Anni 2010/2012



# Sommario

<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>5</b>
<b>1. IL DOMINIO ATM E LA SUA EVOLUZIONE TECNOLOGICA</b> .....	<b>9</b>
<b>1.1 Descrizione generale dei compiti e degli obiettivi dell’ATM</b> .....	<b>9</b>
1.1.1 L’innovazione tecnologica nell’ATM .....	12
<b>1.2 UAS ed RPAS</b> .....	<b>17</b>
<b>1.3 L’ATM: un sistema socio-tecnico complesso</b> .....	<b>25</b>
<b>2. ALGORITMI DI SEPARAZIONE PER UAS</b> .....	<b>32</b>
<b>2.1 Algoritmi di separazione</b> .....	<b>35</b>
<b>2.2 Il progetto ARCA</b> .....	<b>38</b>
<b>2.3 L’algoritmo ARCA</b> .....	<b>39</b>
<b>2.4 Implementazione a bordo di un UAS reale</b> .....	<b>45</b>
<b>2.5 Piano di validazione del progetto ARCA attraverso simulazioni</b> .....	<b>47</b>
<b>2.6 Risultati sperimentali dell’algoritmo ARCA</b> .....	<b>50</b>
2.6.1 Risultati in ambiente esclusivamente unmanned .....	51
2.6.2 Risultati in ambienti misti manned-umanned .....	57
<b>3. INTRODUZIONE DEGLI RPAS NEL SISTEMA DEL CONTROLLO DEL TRAFFICO AEREO</b> .....	<b>64</b>
<b>3.1 Il progetto ICONUS</b> .....	<b>65</b>
3.1.1 Definizione degli scenari operativi degli UAS .....	67
3.1.2 Raccolta dei requisiti per l’introduzione degli UAS/RPAS nel Traffico Aereo .....	70
3.1.3 Validazione dei risultati .....	74
<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>91</b>
<b>APPENDICE A</b> .....	<b>96</b>
Soluzione 2D .....	96

<b>Caso 3D .....</b>	<b>100</b>
<b>APPENDICE B .....</b>	<b>103</b>
<b>APPENDICE C.....</b>	<b>105</b>
<b>Human enablers.....</b>	<b>105</b>
<b>Automation and Human Role Needs .....</b>	<b>108</b>
<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....</b>	<b>110</b>

## **Introduzione**

Molti dei processi e dei servizi che supportano la vita sociale sono il frutto di mutue e complesse interazioni tra ambiente, individui, organizzazioni e tecnologie.

Un sistema che comprende queste componenti e le loro mutue interazioni si definisce sistema socio-tecnico. Un esempio fondamentale di sistema socio-tecnico è la rete Internet, ma possono essere inclusi nella definizione anche organizzazioni tradizionali, come il Sistema Sanitario o quello ferroviario.

La vastezza e la complessità di tali sistemi può rendere molto difficile la creazione di modelli realistici delle loro caratteristiche e dei loro comportamenti. Le componenti del sistema infatti sono spesso caratterizzate da una grande variabilità ed eterogeneità, mentre i compiti e gli obiettivi, insieme ai processi e alle interazioni interne al sistema o con l'esterno, sono definiti a volte con procedure e norme consolidate, a volte informalmente basandosi su 'best practices', spesso combinando i due approcci.

Il raggiungimento degli obiettivi e dei compiti affidati ai sistemi socio-tecnici dipende dall'efficacia e dall'efficienza con le quali essi gestiscono la propria complessità.

Un contributo fondamentale è richiesto alle componenti tecnologiche del sistema. L'automazione, ovvero la delega di specifici compiti alle macchine, ha visto infatti nel secolo scorso un inarrestabile ascesa, che l'ha portata a diffondersi dall'ambiente industriale in cui ha avuto le sue origini a tutti gli ambiti della vita lavorativa. L'invenzione degli elaboratori elettronici ed il conseguente inesorabile

avanzamento tecnologico ha portato il processo di automazione ad estendersi dall'aspetto fisico del lavoro a quello intellettuale. La capacità di calcolo degli attuali computer, e dunque la possibilità di processare enormi quantità di dati anche molto complessi in tempi estremamente ridotti rispetto ad una mente umana, li rende strumenti irrinunciabili per lo svolgimento di molti dei compiti che hanno un effetto diretto sulla società.

D'altro canto alcune caratteristiche prettamente umane come la flessibilità, la capacità di prendere decisioni in presenza di informazioni incomplete o di inferire evoluzioni future del sistema partendo da una osservazione locale, così come la capacità di "rompere le regole" qualora un tale comportamento porti a migliori risultati, rimangono risorse fondamentali per il buon funzionamento di un sistema complesso (Bainbridge, 1983).

L'umano e la macchina sono dunque componenti essenziali complementari del sistema e l'assegnazione di specifiche funzioni e compiti all'uno e all'altra devono tenere conto delle loro caratteristiche e peculiarità.

Una sfida così complessa per gli sviluppatori implica che nelle diverse fasi iterative di design delle tecnologie, dalla raccolta dei requisiti allo sviluppo, alla validazione fino alla messa in esercizio ed alla manutenzione, vi sia una attenzione continua alle caratteristiche variabili ed alle necessità dell'intero sistema socio-tecnico. Uno sviluppo con queste caratteristiche prevede inevitabilmente che i designer siano affiancati da esperti operativi del dominio di applicazione e che tutto il processo sia supportato da un impianto teorico e da metodologie e linee guida cui fare riferimento.

L'obiettivo di questa ricerca è studiare come un approccio multi-disciplinare, fondato su di un solido background teorico, sia in grado di supportare il processo di design e di rinnovamento di componenti tecnologiche all'interno di sistemi socio-tecnici complessi.

Il problema di riferimento per il quale è stata declinata la domanda di ricerca è l'introduzione di UAS (Unmanned Aircraft System), ovvero aeromobili pilotati in

remoto, all'interno del sistema socio-tecnico complesso del Controllo del Traffico Aereo.

All'interno di questo dominio di riferimento le domande che mi sono poste riguardano principalmente l'identificazione critica dei principali requisiti operativi che devono essere necessariamente tenuti in considerazione e raffinati con esperti di settore affinché questa integrazione abbia successo.

In altri termini la domanda cui si cerca di dare risposta in questa ricerca è come supportare il processo di design di nuove tecnologie correlate agli UAS in tale modo da garantire una progressiva integrazione di questi nuovi sistemi negli spazi aerei civili, preservandone e possibilmente aumentandone il potenziale tecnologico innovativo.

Questo elaborato raccoglie il fondamento teorico, le metodologie ed i risultati ottenuti durante la mia ricerca.

Nel Capitolo Primo di questo elaborato verrà descritto il dominio di riferimento della ricerca, ovvero il Controllo del Traffico Aereo e l'innovazione prodotta nello stesso dall'introduzione degli Unmanned Aircraft System.

In seguito verranno introdotti e discussi due progetti internazionali cui ho preso parte durante il mio Dottorato e ne verrà discusso il contributo alla mia domanda di ricerca.

Nel Capitolo secondo verrà trattato il progetto ARCA, che ha contribuito alla definizione del potenziale tecnologico della tecnologia UAS tramite la realizzazione di un prototipo in grado di risolvere, per mezzo di un approccio innovativo basato sulla Teoria dei Giochi, alcuni problemi ben noti nell'ambito del Controllo del Traffico Aereo.

Il Capitolo Terzo sarà dedicato progetto ICONUS, che ha contribuito alla definizione ed alla analisi degli aspetti più critici dell'integrazione degli UAS negli spazi aerei civili, tramite l'utilizzo di metodologie di lavoro collaborativo (focus group) che facilitano l'interazione e la comunicazione tra progettisti e stakeholder del sistema.

In conclusione verranno illustrate le principali risposte fornite dal mio lavoro alla domanda originale, e come tali risposte possano essere uno stimolo nel dibattito scientifico sul tema.

# **1. Il dominio ATM e la sua evoluzione tecnologica**

## **1.1 Descrizione generale dei compiti e degli obiettivi dell'ATM**

L'obiettivo del Controllo del Traffico Aereo (spesso abbreviato come ATM, Air Traffic Management) è quello di garantire che il flusso degli aeromobili sia sicuro, ordinato e spedito, sia a terra che in volo.

I suoi compiti sono definiti dall'ICAO<sup>1</sup> e qui riportati nella forma proposta dall'ANACNA<sup>2</sup> in (ANACNA):

- prevenire le collisioni fra aeromobili;
- prevenire collisioni fra aeromobili sull'aerea di manovra ed ostacoli su questa area;
- accelerare e mantenere un ordinato flusso del traffico aereo;
- fornire avvisi ed informazioni utili per la sicura condotta dei voli;
- notificare alle appropriate organizzazioni, la presenza di aeromobili che necessitano dei servizi di ricerca e soccorso ed assistere tali organizzazioni come richiesto.

Allo scopo di assicurare il corretto Servizio di Controllo del Traffico Aereo, un Ente preposto deve:

---

<sup>1</sup> L'ICAO (International Civil Aviation Organization) è l'organizzazione internazionale per l'aviazione civile più autorevole al mondo. In essa infatti sono rappresentati praticamente tutti i Paesi e le sue linee guida definiscono il riferimento normativo per le maggiori leggi internazionali, comunitarie e nazionali riguardanti il settore.

<sup>2</sup> Associazione Nazionale Assistenti e Controllori Navigazione Aerea, maggiore associazione italiana di categoria.

- disporre di informazioni sul movimento previsto di ogni volo, o variazioni ad esso, e di informazioni aggiornate sullo sviluppo di ciascun volo;
- determinare, dalle informazioni ricevute, le relative posizioni di aeromobili conosciuti l'uno rispetto all'altro;
- emettere autorizzazioni ed informazioni allo scopo di prevenire le collisioni fra aeromobili sotto il proprio controllo e allo scopo di accelerare e mantenere un ordinato flusso di traffico aereo;
- coordinare le autorizzazioni come necessario con gli altri enti ogni qualvolta un aeromobile potrebbe entrare in conflitto con il traffico che opera sotto il controllo di tali enti, e prima di trasferire il controllo di un aeromobili a tali altri enti. (Wikipedia, Servizio di controllo del traffico aereo)

Originariamente il servizio di controllo del traffico aereo era in grado di determinare la posizione dei singoli aerei esclusivamente in maniera “procedurale”, ovvero basata sui dati riportati nel piano di volo e sui “riporti di posizione” da parte dei piloti, con i quali essi confermano l’effettivo sorvolo di punti noti. Ad oggi tale informazione viene determinata nella maggior parte degli spazi aerei mediante l’utilizzo di radar. La posizione, la direzione, l’altitudine di ogni aereo, insieme ad altri dati essenziali vengono presentate al controllore di volo su schermo in raffinate interfacce che, tramite specifici codici colore ed altre informazioni rappresentate in forma grafica, gli permettono di avere una visione aggiornata e completa del traffico attualmente presente nel “settore”, ovvero la porzione di spazio aereo di sua competenza. Il controllore è in contatto radio continuo con i piloti degli aerei, cui comunica precise autorizzazioni (dette *clearances*) riguardanti manovre da eseguire e/o altre informazioni rilevanti per la sicurezza del volo.

Uno dei concetti più importanti per il Controllo del Traffico Aereo è quello di “separazione”: in qualsiasi momento ogni aeromobile deve mantenere una distanza minima sul piano verticale, orizzontale o su entrambi, rispetto a tutti gli

altri aeromobili. Il mantenimento di queste “minime di separazione” garantisce che non si verifichino collisioni tra gli aerei. Le distanze in questione non sono identiche ovunque, ma dipendono dalle caratteristiche dello spazio aereo, ad esempio saranno minori nelle vicinanze di un grande aeroporto con molto traffico, per permettere un maggiore flusso di traffico. Un esempio di minime di separazione valide in vaste regioni dello spazio aereo sono:

- 5 miglia nautiche di separazione laterale (3 nm in vicinanza degli aeroporti, nelle cosiddette Terminal Areas);
- 1000 piedi di separazione verticale.

Un evento di sotto-separazione (o *missed separation*) viene considerato un evento negativo con un impatto rilevante per la safety, sebbene esso non porti necessariamente ad un incidente. Le minime di separazione sono infatti definite in modo da mantenere un buon margine di sicurezza ed una serie di controlli e sistemi (le cosiddette reti di sicurezza o safety nets), insieme alla basilare funzione di *see and avoid*<sup>3</sup> del pilota, sono in grado di intervenire per evitare una possibile collisione.

Responsabile del mantenimento della separazione è sempre il Controllore del Traffico aereo, che fornisce autorizzazioni e direttive ai piloti degli aeromobili in quegli spazi aerei nei quali è previsto in servizio di Controllo del Traffico aereo. L'esercizio di tale servizio richiede ingenti risorse economiche ed umane, pertanto laddove la densità del traffico aereo non è alta, si preferisce comunicare la indisponibilità dello stesso agli equipaggi di volo che provvederanno in altra maniera alla propria separazione (ANACNA).

Il Controllo del Traffico Aereo ha un impatto fondamentale sulla sicurezza dei voli e prevede una preparazione adeguata dei controllori, il supporto di avanzati strumenti tecnologici, una comunicazione efficace ed efficiente tra gli attori coinvolti, la definizione di procedure adeguate. Nel seguito si mostrerà come tali

---

<sup>3</sup> L'ICAO definisce la funzione di see and avoid come la capacità del pilota di evitare collisioni con il terreno e con il traffico circostante basata sull'osservazione visuale dell'esterno.

considerazioni conducano alla definizione del Controllo del Traffico Aereo come sistema socio-tecnico complesso.

### 1.1.1 L'innovazione tecnologica nell'ATM

Un sistema safety critical come l'ATM, che svolge un compito strategico e di elevato impatto sulla società, è inevitabilmente vincolato ad una costante capacità di rinnovarsi, tramite l'integrazione di tecnologie e processi che permettano di fornire un servizio efficace ed efficiente al crescere della domanda.

Allo scopo di illustrare la complessità del ruolo strategico ricoperto dal Controllo del Traffico Aereo e le prospettive di crescita nella domanda dei servizi da esso offerti è opportuno introdurre alcune considerazioni numeriche. Il carico di lavoro richiesto all'ATM e dunque la domanda dei servizi offerti si può quantificare in modo generico, ma piuttosto efficace, analizzando il numero di voli gestiti durante una anno. Dopo una leggera flessione dovuta alla crisi economica negli anni 2009-2010 è previsto un trend crescente per il traffico aereo gestito dall'ATM in Europa, pur limitato dal persistere di condizioni economiche sfavorevoli. Il numero di voli si è attestato, per l'anno 2011 sui 9,78 milioni (Eurocontrol Performance Review Commission, 2012).

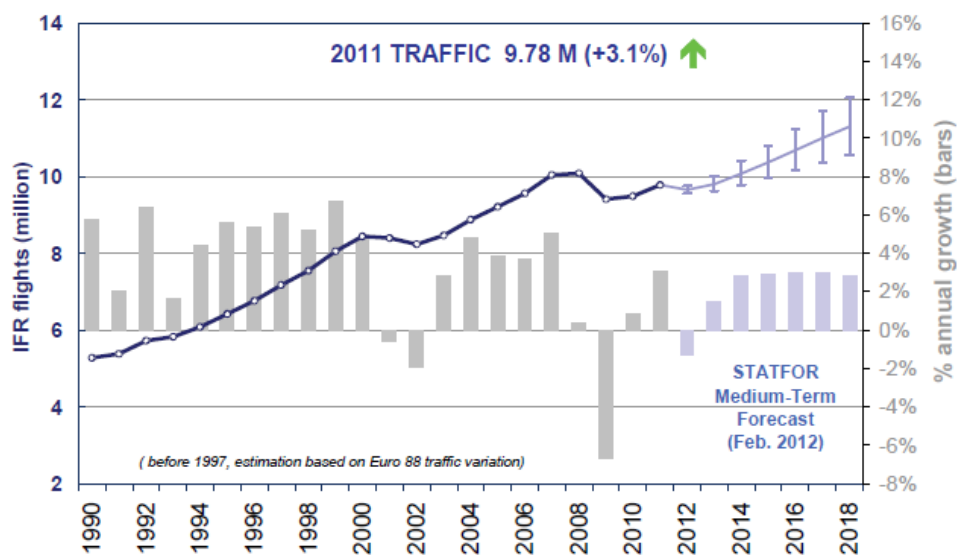


Figura 1: Andamento e previsione del traffico aereo in Europa. Fonte: (Eurocontrol Performance Review Commission, 2012)

Queste evidenze contribuiscono a comprendere le dimensioni e la complessità del sistema ATM e forniscono una stima del suo trend di crescita previsto nei prossimi anni.

Effettivamente il Controllo del Traffico Aereo è da sempre un ambito che offre sfide importanti per la ricerca e lo sviluppo di tecnologie e metodologie di studio. Un esempio importante sono i progressi e le ricerche effettuate nei campi della Ergonomia Cognitiva e dei Fattori Umani, che sono sostanzialmente nati a supporto del design di tecnologie e processi peculiari dell'ATM, per poi allargare con successo il proprio dominio ad altri sistemi safety critical.

Ad oggi diversi programmi di ricerca puntano allo sviluppo ed all'integrazione nella realtà operativa ATM di tecnologie e processi innovativi. In particolare meritano menzione il programma SESAR<sup>4</sup> ([www.sesarju.eu](http://www.sesarju.eu)) in Europa ed il suo corrispettivo negli Stati Uniti, NextGEN ([www.faa.gov/nextgen/](http://www.faa.gov/nextgen/)).

All'interno di questi grandi programmi di ricerca e sviluppo si promuove la collaborazione tra i maggiori stakeholder del settore come industria, compagnie aeree, fornitori di servizio di Controllo del Traffico Aereo, aeroporti, enti di ricerca, università, Piccole e Medie Imprese innovative. Tali sinergie hanno l'obiettivo di favorire lo sviluppo di un piano strategico di innovazione, miglioramento ed armonizzazione del sistema ATM attraverso i diversi Stati.

Alcune delle innovazioni attualmente studiate all'interno di questi programmi sono destinate a rivoluzionare il mondo dell'ATM nei prossimi decenni e meritano di essere menzionate, pur non essendo oggetto di questa ricerca, allo scopo di comprendere la profonda evoluzione attualmente in atto. In particolare ci soffermeremo su alcune delle idee fondamentali di SESAR, ricordando che in molti casi i concetti fondamentali alla loro base, seppur con modalità e tempistiche diverse, sono condivisi anche dall'omologo statunitense Nextgen.

Una delle idee e delle sfide più importanti che si pongono nel dominio dell'ATM e della navigazione aerea in generale è la rivoluzione in atto nella definizione,

---

<sup>4</sup> Il programma SESAR (Single European Sky ATM Research) si pone l'obiettivo di sviluppare e modernizzare il sistema di Controllo del Traffico Aereo in Europa

esecuzione e verifica delle rotte. Attualmente tali funzionalità si basano sul sistema tradizionale, ovvero sulla pianificazione, esecuzione e monitoraggio di un piano di volo che ogni pilota comunica prima del decollo alle autorità competenti. Tale piano di volo prevede il sorvolo di determinati *waypoint* (o *fix*) con determinati vincoli orari, e definisce dei veri e propri percorsi attraverso questi punti (aerovie). La rotta da seguire è costantemente monitorata dal Controllo del Traffico Aereo e viene con esso rinegoziata nel caso in cui debba essere modificata lungo il volo, per ragioni di traffico, condizioni meteo avverse, emergenze od altre motivazioni. Il vincolo di sorvolare alcuni punti fissi è motivato fondamentalmente da due ragioni tecniche: in primis la necessità di mantenere il contatto radio con l'ATC<sup>5</sup> prevede che l'aeromobile sorvoli esclusivamente delle zone coperte da alcune antenne preposte allo scopo dislocate sul territorio; la seconda è una ragione storica risalente a prima dell'avvento del radar, quando gli aeromobili potevano essere localizzati dal Controllo del Traffico Aereo soltanto mediante la comunicazione da parte del pilota dell'avvistamento di determinati punti caratteristici sul terreno (un fiume, un monte etc.), definiti appunto "punti di riporto". Quest'ultima ragione è ancora valida per i voli condotti secondo le regole del volo a vista (VFR<sup>6</sup>).

---

<sup>5</sup> Air Traffic Control

<sup>6</sup> Visual Flight Rules: l'insieme delle regole ritenute necessarie e sufficienti per condurre in sicurezza un volo potendo essere in grado di separarsi a vista da altri aeromobili e dagli ostacoli.

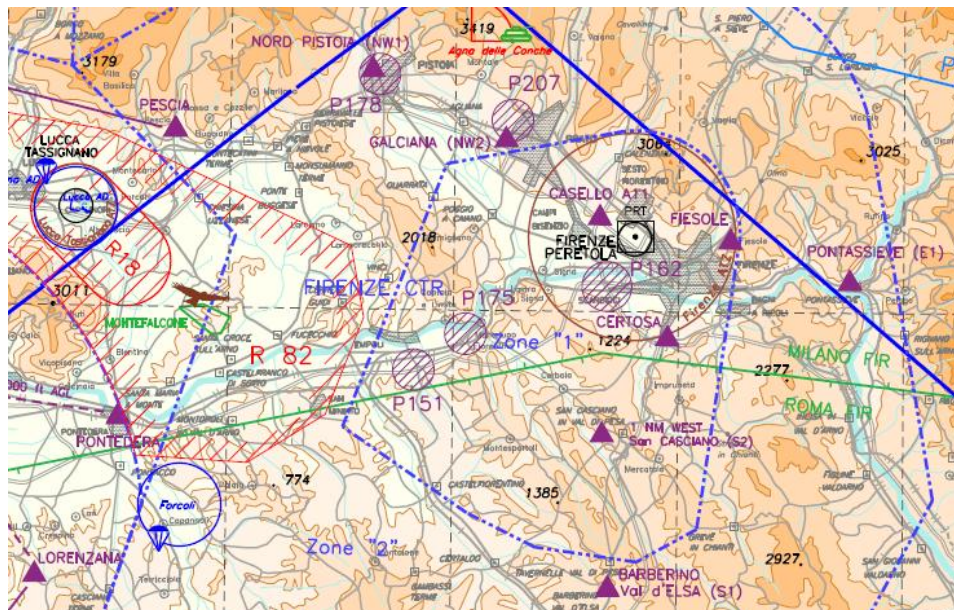


Figura 2: Carta di navigazione aerea della zona di Firenze. I triangoli viola corrispondono ai punti di riporto VFR

La soluzione appena descritta è molto consolidata e permette di gestire lo spazio aereo in modo ordinato e razionale. Essa presenta però delle importanti limitazioni in termini di capacità dello spazio aereo: l'utilizzo delle sole aerovie in spazi aerei molto congestionati causa un sovraccarico di traffico sulle stesse, precludendo l'utilizzo di ampi volumi di cielo, che risultano perciò del tutto inutilizzati. La richiesta di capacità sempre maggiori, unita al consolidamento di tecnologie ormai considerate mature basate su satellite, come la localizzazione di precisione e le comunicazioni, ha condotto alla definizione e allo sviluppo di soluzioni innovative per la navigazione aerea. L'innovazione che il programma SESAR sta portando avanti e che nei prossimi decenni porterà un cambiamento radicale nell'ATM è il concetto di **4D Trajectories**. Una traiettoria 4D può essere definita come una funzione delle 3 dimensioni spaziali e del tempo, che permette di definire, prima del decollo, un profilo esatto del volo che l'aereo sta per intraprendere. Gli strumenti di navigazione di precisione, basate su tecnologie satellitari, permetteranno all'aeromobile di seguire tale traiettoria con un margine di errore minimo, e al controllore del traffico di monitorare continuamente l'aderenza del volo alla traiettoria pianificata. Questo concetto introduce nuove

opportunità per razionalizzare il Controllo del Traffico Aereo ed aumentare la capacità dell'intero sistema. Infatti da una parte le 4DT permettono di liberarsi dai vincoli di waypoint ed aerovie e dall'altra permettono una pianificazione più efficiente ed efficace del traffico. Definendo infatti in anticipo delle *Business Trajectories*, ovvero le rotte che le compagnie aeree utilizzeranno per coprire le proprie tratte, e condividendole con gli altri utenti dello spazio aereo (altre compagnie, voli di stato e militari) e con il Controllo del Traffico Aereo, sarà possibile definire e negoziare delle strategie che soddisfino le richieste di utilizzo dello spazio aereo, minimizzando nel contempo i possibili conflitti tra le traiettorie già in fase di pianificazione.

Il processo decisionale distribuito e collaborativo appena descritto sarà reso possibile grazie ad un altro concetto innovativo proposto da SESAR, ovvero **SWIM**. SWIM può essere definito brevemente come l'"Internet dell'ATM", ovvero una rete che permette di connettere tra loro in modo sicuro tutti gli stakeholder del sistema (Controllo del Traffico Aereo, Compagnie Aeree, Aeroporti, Aviazione Generale<sup>7</sup>, Aerei di Stato e militari etc.), allo scopo di condividere informazioni e di pianificare strategie condivise e distribuite per il raggiungimento di diversi obiettivi di safety e di efficienza.

Una importante innovazione tecnologica che sta muovendo i suoi primi passi in questi anni e che sarà destinata a rivoluzionare alcuni aspetti del trasporto e del lavoro aereo in generale è l'applicazione in ambito civile degli Aeromobili a Pilotaggio Remoto, detti RPAS. L'introduzione di questi nuovi utenti dello spazio aereo all'interno del mondo ATM è un argomento fondamentale di questa ricerca, dunque nei prossimi paragrafi sarà fornita una panoramica dettagliata delle caratteristiche di questi agenti, delle opportunità e delle sfide proposte da questa profonda innovazione.

---

<sup>7</sup> L'aviazione generale è il settore dell'aviazione civile che comprende i voli operati per scopi non commerciali e diversi dal lavoro aereo (ICAO, 2008).

## 1.2 UAS ed RPAS

Osservando la storia della tecnica umana si può riscontrare che molte delle tecnologie che si associano all'idea stessa di progresso hanno trovato la loro origine e primo sviluppo a supporto di attività militari.

Il trasporto aereo non fa eccezione, anzi molto spesso tecnologie sviluppate inizialmente per scopi militari hanno contribuito in maniera fondamentale alla fortuna del settore. A titolo di esempio si può citare l'autentica rivoluzione introdotta dagli aerei con propulsione *jet*, o a reazione, costruiti per primi dai tedeschi durante la Seconda Guerra Mondiale.

L'idea di costruire un aereo che fosse in grado di volare senza un pilota a bordo ha accompagnato sin quasi dalle sue origini la storia dell'aviazione, soprattutto militare. Lo scienziato Nikola Tesla, da molti considerato a ragione un autentico "visionario" in grado di prevedere scenari tecnologici futuri inimmaginabili per i suoi tempi, teorizzava già nel 1915 la costituzione di una flotta di aerei senza pilota a bordo in grado di garantire la sicurezza degli Stati Uniti d'America.

Durante la Seconda Guerra Mondiale sia gli Alleati che la Germania si dotarono di importanti flotte di aeromobili comandati in remoto tramite radio, utilizzati anche in scenari di combattimento. I primi tentativi in questa direzione risalgono addirittura alla Prima Guerra Mondiale, con l'utilizzo di palloni aerostatici guidati a distanza.

A partire dalla guerra del Vietnam ed in seguito sempre di più durante la prima Guerra nel Golfo, per arrivare agli ultimi conflitti in Afghanistan, l'utilizzo di UAS in campo bellico ha visto una crescita costante ed apparentemente inarrestabile. Secondo un recente rapporto del Congresso statunitense (Gertler, 2012), il numero di aeromobili a pilotaggio remoto è arrivato a comporre il 30% dell'intera flotta aerea militare della nazione nel 2010. Secondo alcune autorevoli fonti (Mazzetti, 2012), nel giro di pochissimi anni il numero di voli operato in remoto dalle forze aeree americane supererà il numero di voli tradizionali.

Il successo di questa tecnologia in ambito militare non è difficile da comprendere se si considerano le opportunità che offre, ad esempio in missioni di ricognizione, ma anche in scenari di combattimento: dimensioni variabili (anche minime in caso di voli di ricognizione), azzeramento del rischio di perdite umane, etc.

Possiamo dire dunque che la tecnologia degli UAV (Unmanned Aerial Vehicles), sigla poi sostituita dal termine UAS (Unmanned Aircraft Systems), noti anche come *droni*<sup>8</sup>, è tutt'altro che nuova, anzi è consolidata ormai da più di mezzo secolo di applicazione continua e crescente in ambito militare. La vera novità è il crescente interesse che si sta creando intorno alle possibili e molteplici applicazioni civili di questa tecnologia. Anche in questo caso si può affermare che il futuro è già qui, seppur ancora legato ad ambiti ristretti: missioni aeree senza pilota sono una opzione tecnologica da considerare per compiti civili quali la sorveglianza di infrastrutture critiche come centrali nucleari o oleodotti, sorveglianza ambientale o prevenzione di incendi, operazioni di polizia, monitoraggio dei confini internazionali in zone di pace interessate a fenomeni di immigrazione irregolare o traffici clandestini. In generale si può dire che ad oggi i maggiori utilizzi previsti per gli UAS sono schematizzabili efficacemente mediante le 3 D, *dull, dirty and dangerous*, ovvero missioni caratterizzate da uno o più delle seguenti caratteristiche:

- eccessiva monotonia e ripetitività dei compiti, ad esempio la sorveglianza continua di un'area delimitata, con bassa frequenza di anomalie;
- condizioni ambientali particolarmente avverse, come nel caso del monitoraggio di aree fortemente inquinate o soggette a radiazioni;
- elevato rischio della missione, come ad esempio nel caso di voli a bassa quota in luoghi con orografia complessa o in condizioni di scarsa visibilità.

Sostanzialmente si tratta di delegare a mezzi senza pilota a bordo quelle missioni in cui la presenza dell'umano potrebbe metterne a rischio l'incolumità, o che

---

<sup>8</sup> Il termine drone, seppur utilizzato largamente anche dalla stampa per indicare velivoli a pilotaggio remoto, perlopiù militari, ha in realtà nell'ambito della robotica un'accezione più generale di veicolo robotizzato, non necessariamente aereo.

prevedono condizioni di lavoro ed ambientali non accettabili. In futuro non è escluso che gli UAS possano essere utilizzati per trasporto di merci (cargo) o, come definitiva evoluzione, di passeggeri.

Fornire stime accurate sul valore attuale e sul potenziale di espansione del settore UAS è un'operazione complessa ed esula dagli scopi di questa ricerca, ma è opportuno evidenziare come diversi studi mostrano come il mercato degli UAS per scopi civili sia in salute e destinato ad una ulteriore espansione nei prossimi anni. Le dimensioni e la stabilità di questa crescita è però strettamente vincolata alla risoluzione di alcune sfide, considerate di decisiva rilevanza per il successo commerciale di queste applicazioni (Lukovic, 2011).

La proliferazione degli UAS per scopi civili introduce infatti delle problematiche piuttosto importanti. Al momento tutte le missioni di aeromobili senza pilota prevedono che lo spazio aereo all'interno del quale si svolgono sia precluso al volo di altri aeromobili tradizionali, mediante l'istituzione delle cosiddette "aree segregate", o quantomeno che le altitudini raggiunte dagli UAS non siano tali da interferire con il normale traffico. In ogni caso queste missioni vengono svolte sorvolando aree scarsamente popolate.

Queste limitazioni si rendono necessario per diverse ragioni: in primis gli standard di safety degli UAS non sono ancora stati definiti, come invece accade per tutti gli aeromobili tradizionali; gli UAS non sono ancora integrati nel sistema del controllo del traffico aereo e dunque non possono partecipare al complesso processo di separazione; le responsabilità del pilota e dell'equipaggio remoto non sono ancora del tutto chiare e definite, soprattutto per ciò che riguarda alcune operazioni che prevedono procedure automatiche.

Queste problematiche sono evidentemente molto limitanti per lo sviluppo futuro di questa tecnologia e dunque sono molte le aspettative e le questioni che le istituzioni normative internazionali sono chiamate a considerare e a risolvere.

Un passo importante per la definizione di queste problematiche è stato fatto dall'ICAO, nell'ottobre 2011, con la sua circolare 328, intitolata Unmanned Aircraft Systems (UAS) (ICAO, 2011). E' inevitabile che il parere espresso

dall'ICAO, seppur in forma di Circolare, e dunque non ancora formalizzato in direttive, sia considerato fondamentale e vincolante nel definire il presente ed il futuro degli UAS. Per queste ragioni partiremo proprio dalla Circolare 328 dell'ICAO (ICAO, 2011) per definire alcuni concetti fondamentali per la comprensione del lavoro svolto in questa ricerca.

La prima affermazione presente nella Circolare è l'abbandono della dicitura UAV (Unmanned Aerial Vehicles) a favore del termine UAS (Unmanned Aircraft Systems). Quella che può sembrare una questione di mera nomenclatura nasconde invece una concezione completamente diversa, che ruota intorno al termine *aircraft* (traducibile in italiano con aeromobile). La definizione di aeromobile risale alla Convenzione di Chicago del 1944<sup>9</sup> e raccoglie molte differenti categorie, dai palloni aerostatici ai dirigibili, aeroplani ed elicotteri. Tutte queste categorie di aeromobili sono accomunate da precise indicazioni, fornite dall'ICAO e implementate dagli organismi nazionali e sovranazionali, che riguardano il training e le licenze necessari per l'equipaggio, i requisiti di sicurezza dei sistemi, gli standard di separazione dal traffico circostante, ecc. Il sancire l'appartenenza degli UAS a questa classe li rende soggetti a vincoli molto stringenti.

Un'altra indicazione fondamentale contenuta nella Circolare 328 è la definizione di una sottoclasse degli UAS, gli RPAS (Remotely Piloted Aircraft System). Questa categoria raccoglie tutti gli UAS pilotati da un pilota remoto dotato di licenza, che è in grado di monitorare l'aeromobile da una postazione esterna ad esso durante tutte le fasi di volo (includendo le manovre a terra, dette di *taxiing*). Il pilota è dunque responsabile della condotta e della sicurezza del volo, avendo anche in carico la comunicazione con il Controllo del Traffico Aereo e la responsabilità finale della risoluzione di conflitti con il traffico circostante. L'aeromobile, o RPA (Remotely Piloted Aircraft), può essere dotato di sistemi di auto-pilotaggio, ma il pilota umano deve essere in grado in qualsiasi momento di

---

<sup>9</sup> La Convenzione di Chicago fu voluta per definire e raccogliere le principali indicazioni e linee guide dell'aviazione civile moderna. A tutt'oggi è il riferimento per gran parte dei concetti fondamentali del dominio.

intervenire, prendendo il comando manuale, seppur in remoto, dell'apparecchio. Questo requisito è sostanzialmente identico a quanto avviene sugli aerei tradizionali dotati di autopilota, che devono prevedere la possibilità per il pilota di passare prontamente ad una modalità di navigazione manuale, a sua discrezione.

Restano dunque fuori dalla definizione di RPAS gli UAS autonomi, ovvero dei sistemi in grado di portare a termine una missione (o alcune fasi di una missione) senza il necessario intervento, o quantomeno il continuo monitoraggio, di un pilota umano. Riguardo la possibilità e l'opportunità di introdurre negli spazi aerei questo tipo di agenti in un futuro relativamente prossimo l'ICAO è particolarmente drastica, come dimostra questo estratto dalla Circolare 328 (p. 3):

*“Only the remotely-piloted aircraft (RPA)[, however,] will be able to integrate into the international civil aviation system in the foreseeable future. The functions and responsibilities of the remote pilot are essential to the safe and predictable operation of the aircraft as it interacts with other civil aircraft and the air traffic management (ATM) system.*

*Fully autonomous aircraft operations are not being considered in this effort, nor are unmanned free balloons nor other types of aircraft which cannot be managed on a real-time basis during flight.”*

Nel seguito faremo dunque riferimento soprattutto alla classe degli RPAS, salvo ove esplicitamente specificato.

Una considerazione importante riguarda l'utilizzo del termine system, poiché anche in questo caso la scelta della terminologia ha un significato da approfondire. Gli UAS in generale, e gli RPAS in particolare, sono sistemi che comprendono diverse componenti: essi includono, oltre al velivolo vero e proprio (UA o RPA), la stazione di pilotaggio a terra (detta Remote Pilot Station o RPS) ed il canale di comunicazione tra i due (Command and Control Link, o C2L).

Da questo schema emergono le particolarità di questo tipo di aeromobili rispetto a quelli tradizionali. Per prima cosa, sebbene al pilota vengano presentate informazioni dettagliate riguardo l'orografia del terreno sorvolato, l'eventuale presenza di traffico circostante, oltre ai dati di navigazione e controllo provenienti

da strumenti non dissimili da quelli tradizionali, la sua “vista” e la sua situation awareness<sup>10</sup> non possono essere considerate equivalenti a quelle di un pilota di aerei tradizionali. La presenza poi di un link di comunicazione basato su onde radio, e dunque di un segnale propagato attraverso l’aria per l’invio delle informazioni riguardanti le manovre da eseguire, introduce problematiche legate al ritardo nell’esecuzione della manovra o nella ricezione del feedback corrispondente inviato dall’RPA.

Le operazioni degli RPAS si basano dunque su caratteristiche specifiche legate alle peculiarità appena descritte. Nel dettaglio è possibile definire tre diverse modalità di utilizzo che si differenziano per come il pilota mantiene il contatto con il velivolo:

- VLOS (Visual Line of Sight), ovvero la condizione in cui tutte le operazioni si svolgono mentre il velivolo è monitorato letteralmente “a vista” dal pilota, quindi tipicamente in un volume molto limitato;
- RLOS (Radio Line of Sight) fa riferimento alle operazioni svolte dal pilota utilizzando esclusivamente un collegamento radio diretto per il C2L con il velivolo e senza la possibilità materiale di osservarlo (si è dunque in una condizione BVLOS, Beyond Visual Line of Sight);
- BRLOS (Beyond Radio Line of Sight) è la modalità di utilizzo in cui il pilota comunica con il velivolo attraverso un segnale che viene ritrasmesso da un qualche tipo di infrastruttura, che dunque gioca un ruolo importante sebbene non possa essere considerata parte del RPAS. Questa modalità può essere utilizzata nel caso in cui le operazioni vengano svolte ad elevata distanza dalla RPS o in zone con una orografia particolare, ovvero nelle situazioni in cui una comunicazione radio diretta non è sufficiente ad instaurare il C2L. Un caso tipico di infrastruttura di ritrasmissione utilizzata in questi casi è il satellite.

---

<sup>10</sup> Con questo termine si fa riferimento alla capacità di riconoscere e comprendere lo stato in cui si trova un sistema e di prevederne l’evoluzione (Endsley, 1995).

Ad oggi molte missioni sono svolte nella modalità VLOS, che fornisce maggiori garanzie di safety poiché il pilota è in grado di controllare in maniera piuttosto agevole e naturale la separazione dal terreno e dall'eventuale traffico circostante. Appare evidente però che questa modalità introduce delle notevoli limitazioni all'uso degli RPAS, legate soprattutto alla distanza che può intercorrere tra un RPA e il pilota che lo controlla a vista, poiché essa dipende dalle dimensioni dell'aereo, ma solitamente non supera i 500 metri (Civil Aviation Authority - Safety Regulation Group, 2012). Facendo riferimento ad alcuni degli utilizzi più frequenti, attuali e previsti, è difficile immaginare missioni antincendio in zone montuose o il monitoraggio di vaste aree come il percorso di un oleodotto vincolati dal requisito di mantenersi nel raggio visivo del pilota.

Una delle maggiori sfide che si pongono per l'industria, la ricerca e le istituzioni preposte alla regolamentazione del traffico aereo interessate all'integrazione degli RPAS nello spazio aereo è quella di fornire tecnologie, procedure, strumenti che permettano al pilota e all'ATC di gestire ed operare i voli a pilotaggio remoto nelle modalità BLOS e BRLOS con un livello di sicurezza equivalente a quello dei voli operati in VLOS.

Nel definire caratteristiche ed operazioni degli RPAS abbiamo finora considerato questo tipo di sistemi come un'unica categoria caratterizzata dall'essere velivoli pilotati in remoto. Nella realtà il concetto di RPAS raccoglie velivoli molto differenti tra loro in termini di performance, propulsione, altitudine di crociera, peso, autonomia (qui intesa in termini di consumo di energia/carburante). Non è un obiettivo di questo lavoro fornire una categorizzazione esaustiva degli RPAS, ma per comprendere la varietà di sistemi differenti che tale definizione include può risultare utile la presentazione di una tabella riassuntiva estratta da (UVS International, 2012), una delle più complete pubblicazioni internazionali riguardante gli UAS:

RPAS Categories	Acronym	Range (KM)	Flight Altitude (m)	Endurance (hours)	MTOW (Kg)	Currently Flying
<b>Tactical</b>						
Nano	η	< 1	100	< 1	< 0,025	yes
Micro	μ (Micro)	< 10	250	1	< 5	yes
Mini	Mini	< 10	150 <sup>b</sup> to 300 <sup>a</sup>	< 2	< 30 (150 <sup>b</sup> )	yes
Close Range	CR	10 to 30	3.000	2 to 4	150	yes
Short Range	SR	30 to 70	3.000	3 to 6	200	yes
Medium Range	MR	70 to 200	5.000	6 to 10	1.250	yes
Medium Range Endurance	MRE	> 500	8.000	10 to 18	1.250	yes
Low Altitude Deep Penetration	LADP	> 250	50 to 9.000	0,5 to 1	350	yes
Low Altitude Long Endurance	LALE	> 500	3.000	> 24	< 30	yes
Medium Altitude Long Endurance	MALE	> 500	14.000	24 to 48	1.500	yes
<b>Strategic</b>						
High Altitude Long Endurance	HALE	> 2000	20.000	24 to 48	(4.500 <sup>c</sup> )12.000	yes
<b>Special Purpose</b>						
Unmanned Combat Aerial Vehicle	UCAV	approx. 1500	10.000	approx. 2	10.000	yes
Offensive	OFF	300	4.000	3 to 4	250	yes
Decoy	DEC	0 to 500	5.000	< 4	250	yes
Stratospheric	STRATO	> 2000	>20.000 & <30.000	> 48	TBD	no
Exo-stratospheric	EXO	TBD	> 30.000	TBD	TBD	no
Space	SPACE	TBD	TBD	TBD	TBD	no

TBD = To Be Defined    <sup>a</sup> = according to national legislation    <sup>b</sup> = in Japan    <sup>c</sup> = Predator B

Figura 3: Classificazione degli RPAS (fonte: RPAS Yearbook 2012/2013, 10th Edition)

Pur non entrando nei dettagli delle caratteristiche menzionate in questa classificazione, appare evidente un divario notevole all'interno di alcune colonne. Un dato facilmente interpretabile è il peso massimo al decollo (MTOW, Maximum Take-Off Weight), che può variare da pochi grammi a diverse tonnellate, paragonabile a quello di un piccolo aereo di linea. Stiamo parlando dunque di un vastissimo assortimento di sistemi, pensati per usi diversi e che necessitano di standard di sicurezza e dunque di tecnologie e procedure differenti, che tengano conto di queste peculiarità. Nel seguito di questo lavoro si farà riferimento principalmente alle categorie di RPAS che escludono le classi “nano”, “micro” e “mini”. L'interesse infatti sarà focalizzato sull'inserimento degli aeromobili pilotati in remoto all'interno del sistema ATM e dunque i modelli più piccoli, destinati ad un utilizzo ad altitudini molto basse che non interferiscono con il normale traffico, non costituiscono un argomento di interesse. Inoltre, per loro stessa natura, le missioni condotte con queste tipologie di RPAS sono principalmente, se non esclusivamente condotte in modalità VLOS e dunque relativamente più semplici da gestire. La maneggevolezza, la semplicità d'uso e la possibilità di operare senza rischi di interferenze con il traffico aereo, insieme ad un costo più limitato, rendono comunque le applicazioni basate su UAS leggeri o

super-leggeri molto interessanti da un punto di vista commerciale e dunque un loro sviluppo piuttosto sostenuto è previsto nel medio e lungo termine. Sarà dunque necessario nel futuro prossimo definire standard di sicurezza stringenti anche per le categorie di peso inferiori, tanto più che la maggior parte dei working group nazionali ed internazionali sugli UAS prevedono lavori specifici sull'argomento (EUROCAE WG73).

Dopo aver descritto il dominio di riferimento ed aver introdotto le problematiche e le opportunità correlate all'introduzione degli UAS/RPAS all'interno dell'attuale sistema ATM, nel paragrafo seguente verrà presentato e descritto un quadro di riferimento teorico che permette di comprendere, tramite un approccio multidisciplinare con un solido fondamento scientifico, le ragioni per cui tale introduzione pone sfide particolarmente complesse che sono state tra i principali stimoli per questa ricerca.

### **1.3 L'ATM: un sistema socio-tecnico complesso**

Il Controllo del Traffico Aereo (Air Traffic Management, ATM) è un interessante esempio di sistema complesso. In letteratura sono molteplici le definizioni informali di sistema complesso, per gli scopi di questa trattazione due in particolare offrono spunti interessanti:

- *A complex system is one in which there are multiple interactions between many different components* (Rind, 1999)
- *A complex system is one that by design or function or both is difficult to understand and verify* (Weng, Bhalla, & Iyengar, 1999)

Qui si centrano alcune delle considerazioni fondamentali che guideranno il percorso di questa ricerca. Nella definizione di Rind si pone l'attenzione sulla natura spesso eterogenea delle parti che compongono il sistema in questione e sulle mutue e fitte interazioni che coinvolgono tali componenti (spesso a loro volta sottosistemi con vari gradi di complessità). Spesso i sistemi complessi

vengono rappresentati topologicamente come reti (network), i cui nodi sono le componenti ed ogni arco rappresenta una potenziale interazione tra di loro.

La definizione di Weng et al. si focalizza invece sull'effetto che la complessità induce sul comportamento e l'evoluzione dell'intero sistema. Si tratta del cosiddetto comportamento emergente (emergent behaviour), ovvero un comportamento od una evoluzione che il sistema può manifestare e che non discende banalmente dal comportamento delle singole parti. La differente natura delle componenti coinvolte e le loro mutue e continue interazioni possono generare infatti delle proprietà emergenti del sistema, ovvero caratteristiche che difficilmente possono essere messe in relazione diretta con le proprietà delle singole parti. Si può giungere dunque ad una condizione in cui, sebbene le componenti abbiano delle proprietà ben definite ed un comportamento deterministico, il sistema risultante sia non deterministico e presenti delle proprietà inattese. In termini matematici si può affermare che le componenti sono vincolate tra loro da relazioni non lineari e quindi il sistema stesso si può dire non lineare.

Le proprietà ed i comportamenti emergenti sono difficili da modellare in fase di design ed è altrettanto complicato prevedere se ed in quale momento si manifesteranno.

Le considerazioni di carattere generale fin qui esposte riguardo i sistemi complessi contribuiscono alla definizione di un quadro teorico di riferimento, inquadrando le linee guida della ricerca esposta in questo elaborato. Nel seguito vedremo infatti come tali considerazioni e riferimenti teorici hanno indirizzato le scelte e gli approcci seguiti durante tutto il mio lavoro di ricerca.

Se si osserva il sistema ATM soffermandosi sulla sua natura organizzativa emerge una caratteristica molto evidente, ovvero l'integrazione al suo interno di due componenti fondamentali e strettamente interconnesse: la tecnologia e l'umano. Il sistema ATM è infatti un sistema socio-tecnico, ovvero un sistema le cui performance sono il risultato di una stretta interazione tra l'uomo e le componenti

tecnologiche, con il supporto di regole e procedure che regolano le interazioni tra le diverse componenti, e tra queste componenti e il mondo esterno.

L'ATM è un caso molto interessante e studiato di sistema socio-tecnico, tanto che molti dei contributi dati all'analisi di tali sistemi provengono dallo studio dei processi e degli agenti coinvolti nel Controllo del Traffico Aereo. Alcune caratteristiche fondamentali contribuiscono a delinearne le peculiarità e meritano di essere evidenziate:

- l'ATM è un sistema *safety critical*, ovvero il suo obiettivo principale è quello di preservare la sicurezza e l'incolumità delle persone;
- nel sistema sono presenti componenti tecnologiche fortemente innovative a supporto dell'operatore umano (pilota, controllore di volo) che con la sua professionalità, esperienza e capacità di problem solving resta l'elemento centrale del sistema ed è il responsabile ;
- all'ATM sono richieste performance sempre crescenti in termini di numero di voli da gestire e riduzione dei costi (in termini di ritardi e deviazioni dalle rotte ottimali), pur garantendo uno standard di safety costante.

Queste considerazioni devono dunque animare e supportare il processo di design e la successiva validazione di ogni nuova tecnologia, procedura, regola che si introduce nel sistema. Ogni cambiamento apportato all'interno di un sistema così complesso ed articolato deve essere valutato e considerato per i suoi effetti sull'intero sistema, poiché un approccio locale che consideri esclusivamente le singole componenti direttamente impattate dal cambiamento in questione rischia di escludere dalla visione i cambiamenti a livello sistemico, nuovi comportamenti emergenti che si possono manifestare, a seguito del cambiamento, in punti del sistema e con tempistiche spesso imprevedibili.

In letteratura sono molti i modelli concettuali proposti per lo studio e l'analisi dei sistemi socio-tecnici complessi. Tra questi merita menzione il modello SHELL, che verrà brevemente descritto in questa sezione. Sebbene questo modello non sia stato puntualmente applicato ai singoli casi di studio che compongono gran parte

di questa ricerca, esso si è dimostrato un valido strumento, fornendo un framework teorico di riferimento per il mio lavoro.

Il modello SHEL proposto da Elwyn Edwards (Edwards, *Man and machine: Systems for safety*, 1972) e la sua evoluzione SHELL, sviluppato da Frank Hawkins (Hawkins, 1993), in particolare, adottano una visione sistemica del sistema socio-tecnico, pur mantenendo una certa semplicità nell'analisi, al fine di evitare inutili sovraccarichi di informazione.

SHEL nasce nell'ambito dell'aviazione civile per lo studio e l'integrazione dei Fattori Umani con le componenti tecniche del sistema. Per descrivere le componenti di un modello SHEL e le loro mutue interazioni possiamo partire da una semplice rappresentazione grafica e dalle parole stesse di Edwards, estratte dal libro *Human Factors in Aviation* (Edwards, *Human Factors in Aviation*, 1988, p. 11):

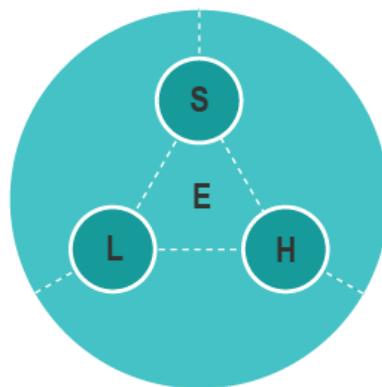


Figura 4: Modello SHEL (Edwards)

“System designers typically have at their disposal three types of resources. The first consists of physical property – buildings, vehicles, equipment, materials and so forth. This might be termed hardware. The second resource is much less visible, comprising the rules, regulations, laws, orders, standard operating procedures, customs, practices and habits, which govern the manner in which the system operates and in which the information within is organized. This is the software, much –but not all- of which will be set down in a collection of documents. Finally, human beings, or “liveware”, make up the third resource.

No arrangement of hardware, software and liveware exists in vacuo. In reality, these resources will operate in the context of an environment made up of physical, economic, politic and social factors.”

Ancora una volta in questo estratto si sottolinea l'importanza dello studio delle interazioni tra le componenti del sistema, all'interno di un ambiente definito e determinato, con le sue abitudini, regole e peculiarità. E dunque l'analisi di un sistema safety-critical non può limitarsi all'affidabilità delle singole componenti, ma deve esaminare anche gli effetti indesiderati che possono generarsi dalle interazioni reciproche.

A partire dal modello SHEL Hawkins (1993) ha proposto l'approccio SHELL, ancor più centrato sull'importanza del Fattore Umano e in cui si aggiunge una ulteriore componente liveware, posizionata al centro nel diagramma seguente:

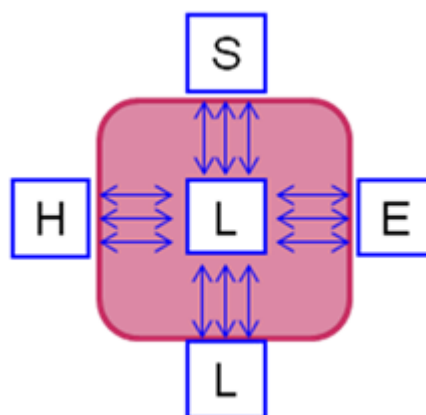


Figura 5: Modello SHELL (Hawkins)

Il vantaggio di questa rappresentazione è dato dal fatto che, ponendo il focus sull'attore umano (la L al centro), gli altri umani possono essere analizzati come risorse utilizzate dal soggetto per raggiungere i propri scopi. Viene dunque modellata l'attività di cooperazione, in cui le persone giocano un ruolo di mediazione nell'attività del soggetto e sono strumentali al raggiungimento di mete ed obiettivi. La leadership, il teamwork e la collaborazione sono chiari esempi di

interazioni Liveware-Liveware all'interno di un modello SHELL. Un altro fondamentale esempio di stretto legame tra due componenti è l'interfaccia Liveware-Hardware, ovvero l'interazione tra l'uomo e la macchina. E' qui che si posizionano le problematiche classiche di HMI ed ergonomia. Un esempio di interazione Liveware-Software sono le leggi, procedure, standard e convenzioni che regolano il modo in cui un'azione deve essere eseguita, così come il vero e proprio software informatico sviluppato per operare su di un sistema automatico. Questi sono solo alcuni esempi degli innumerevoli scenari che vedono coinvolte due o più componenti del sistema, che collaborano ed interagiscono durante lo svolgimento di un'azione.

La lezione che si può apprendere dall'analisi dei modelli qui proposti è ancora una volta che il corretto funzionamento di un sistema socio-tecnico complesso come l'ATM è un risultato emergente delle interazioni tra le componenti del sistema e dipende da una loro adeguata integrazione. Ogni cambiamento che riguarda una delle componenti coinvolte deve essere attentamente analizzata e valutata a livello dell'intero sistema, affinché non si possa ripercuotere con effetti negativi inattesi in qualche fase del processo anche distante dal punto di applicazione della modifica. Non a caso il modello SHELL, seppur proponendo una visione semplificata del sistema socio-tecnico, viene utilizzato nei processi di risk assessment di un sistema ed anche nelle investigazioni successive ad incidenti. Molto spesso le cause di un incidente in un sistema safety critical, infatti, possono essere imputate ad una mancata od inesatta valutazione dei rischi ricadenti sull'intero sistema dell'introduzione o della modifica di alcune componenti. Il sito web "Wiki of Science" (Wiki of Science) contiene l'analisi basata sul modello SHELL di diversi scenari di incidenti aerei imputabili ad una insufficiente cura e attenzione alle interazioni tra le diverse componenti del sistema. Questo strumento può risultare molto utile per comprendere la varietà e la complessità delle interazioni, fornendo anche dei preziosi, sebbene a volte tragici, esempi.

Le considerazioni fin qui esposte contribuiscono alla composizione del fondamento scientifico su cui si basa la mia ricerca. Nel seguito del lavoro la

teoria dei sistemi complessi socio-tecnici ed il modello SHELL, sebbene non esplicitamente utilizzato come modello ai fini dell'analisi dei sistemi, ma come approccio teorico alla definizione del problema, comporranno il quadro di riferimento teorico fornendo strumenti e linee guida essenziali alla ricerca.

Con la descrizione del quadro teorico riguardante i sistemi socio-tecnici si conclude la parte di questo elaborato dedicata alla definizione della domanda di ricerca e all'inquadramento del problema di riferimento. Il capitolo seguente sarà dedicato al lavoro svolto all'interno del progetto ARCA, che mi ha permesso di confrontarmi con tematiche allo stato dell'arte della ricerca internazionale nell'ambito dei sistemi UAS/RPAS e di contattare ed affrontare alcune delle sfide tecnologiche più attuali ed interessanti correlate al dominio in questione, fornendomi metodologie, strumenti e risultati utili ad affrontare la mia domanda di ricerca.

## **2. Algoritmi di separazione per UAS**

Il principale caso di studio su cui si focalizza questo lavoro di ricerca è lo studio di tecnologie, procedure e concetti operativi che garantiscano una introduzione sicura ed efficiente degli UAS all'interno di spazi aerei condivisi con il normale traffico.

Il concetto di separazione del traffico aereo è considerato un fattore chiave nel sistema ATM, come già esposto nel capitolo precedente. Non sorprenderà dunque che la capacità di separarsi dal restante traffico è considerata una delle funzionalità e delle sfide più importanti che si pongono ai progettisti e sviluppatori di sistemi UAS/RPAS, come testimoniano le ricerche (MIDCAS Consortium, 2010) effettuate all'interno del progetto di MIDCAS ([www.midcas.org](http://www.midcas.org), finanziato dalla European Defence Agency), che ha raccolto le opinioni qualificate di stakeholders importanti del settore (industria, ricerca, regulators).

La capacità di gestire e garantire la separazione tra gli aeromobili è uno dei compiti principali affidati all'ATM, e dunque si basa fundamentalmente sulla professionalità e sull'esperienza dei controllori del traffico aereo. Essi sono adeguatamente supportati da sistemi tecnologici che forniscono una chiara visione in tempo reale del traffico, che permettendo loro di prevedere l'evoluzione del sistema e di scegliere di conseguenza le strategie più adeguate.

Nonostante i controllori del traffico aereo lavorino in un ambiente altamente tecnologico, caratterizzato tra gli altri da strumenti automatici che forniscono adeguati allarmi in caso di condizioni potenzialmente pericolose, le decisioni

finali riguardo le manovre di separazione sono affidate interamente all'operatore umano, che ne è responsabile. La gestione di un numero elevato di voli, in condizioni atmosferiche variabili, in un contesto fortemente dinamico e caratterizzato da eventi difficilmente prevedibili, come ad esempio la chiusura di uno spazio aereo, l'eventualità di un dirottamento o di una grave aviaria su di uno o più aerei, è un compito molto complesso che prevede capacità cognitive e decisionali prettamente umane. In altri termini è richiesta una forma di "intelligenza" complessa, una proprietà difficilmente definibile, progettabile e dimostrabile per un agente artificiale.

Le considerazioni appena esposte non hanno scoraggiato la comunità scientifica dal ricercare soluzioni tecnologiche al problema di mantenere la separazione tra aeromobili in un ambiente complesso come l'ATM. Infatti, se l'idea di delegare integralmente il compito di controllare il traffico aereo a sistemi automatici appare eccessivamente avveniristica e di difficile realizzazione ed accettazione sociale, non è escluso che tali sistemi possano supportare e semplificare il compito degli agenti coinvolti nei complessi processi decisionali in questione. Nella realtà attuale, caratterizzata da una continua richiesta di efficienza in uno scenario di traffico molto sostenuto, si può piuttosto affermare che è difficile immaginare un sistema ATM in cui non sia fortemente integrata una componente importante di strumenti automatici di supporto alla decisione.

Nel seguito ci soffermeremo in particolare sulle tecnologie che forniscono un supporto alla separazione tra gli aeromobili.

La presenza di sistemi centralizzati in grado di integrare i dati radar con altre informazioni provenienti dagli aeromobili stessi e da altre fonti, con l'obiettivo di fornire possibili soluzioni che garantiscano la separazione, può essere prevista in ACC (Area Control Center) che gestiscono grandi quantità di traffico. In questo caso il controllore può valutare la soluzione proposta dal sistema automatico ed utilizzarla per risolvere situazioni locali, semplificando così la gestione globale di un quadro complesso (Kahne & Frolow, 1996).

Un altro possibile approccio alla separazione tra gli aeromobili è quello basato su di un sistema distribuito. In questo caso la separazione è delegata ai piloti dei singoli aerei, che devono essere dunque in grado di “auto-separarsi” dal traffico circostante. Questo approccio è operativo attualmente in zone di scarso traffico od in aree in cui la copertura radio del collegamento con l’ATM è poco affidabile (ad esempio nel caso di voli transoceanici). Nel caso in cui l’auto-separazione sia operata dagli equipaggi dei singoli aeromobili (*airborne self-separation*) il supporto di adeguati sistemi tecnologici è imprescindibile, poiché basarsi esclusivamente sull’osservazione visiva del pilota (separazione a vista) è un’opzione non praticabile per diverse evidenti considerazioni: tipicamente gli aeromobili di linea volano secondo le regole IFR<sup>11</sup> e possono operare in condizioni di scarsa visibilità, in cui è impossibile distinguere il traffico circostante a vista con sufficiente anticipo; le velocità relative degli aerei che condividono gli stessi spazi aerei sono così elevate che i normali tempi di reazione dei rispettivi piloti, conseguenti all’avvistamento di un altro velivolo in rotta di collisione, difficilmente possono garantire il mantenimento di un margine di separazione accettabile.

Un sistema di supporto alla auto-separazione deve dunque prevedere come funzionalità di base la possibilità di conoscere la posizione, l’altitudine, velocità e vettore direzione di tutti gli aerei circostanti, in un intervallo di spazio molto maggiore di quello coperto dalla semplice osservazione. Le informazioni in questione possono provenire dal radar, oppure possono essere raccolte direttamente interrogando il sistema di posizionamento satellitare degli altri aeromobili, secondo protocolli standard ad hoc, che verranno introdotti in seguito. Questi dati, se presentati al pilota con la dovuta efficacia e chiarezza, permettono di aumentare la sua situation awareness, permettendogli di approntare strategie precoci per mantenere la separazione dal traffico circostante.

---

<sup>11</sup> Instrumental Flight Rules: sono le regole di volo comprendenti una serie di regolamenti e procedure ideate per consentire il volo degli aeromobili anche in condizioni nelle quali i piloti non siano in grado di vedere ed evitare ostacoli, il terreno o altri aeromobili in volo.

Un approccio più avanzato prevede che il sistema stesso, mediante l'utilizzo di specifici algoritmi, sia in grado di calcolare la strategia di separazione che considera più sicura ed efficiente, e la proponga al pilota, che può decidere se implementarla o semplicemente ignorarla.

Questa soluzione si presenta anche come una delle più avanzate ed adatte per l'applicazione agli RPAS, proprio perché la collocazione spaziale del pilota a terra rende impraticabile la possibilità di una separazione "a vista".

Nel paragrafo seguente verrà presentata una breve panoramica degli algoritmi di separazione proposti in letteratura, per posizionare all'interno di essa l'approccio innovativo proposto in questa ricerca.

## **2.1 Algoritmi di separazione**

Le attuali operazioni di controllo del traffico aereo sono basate su regole di risoluzione dei conflitti e sull'esperienza dei controllori di volo. Approcci basati su regole possono funzionare nel caso siano coinvolti molti aerei, ma in tal caso può essere necessario un numero proibitivo di regole per gestire tutte le situazioni che si verificano quando sono coinvolti diversi aerei. Un esempio di algoritmo di conflitto basato su regole di risoluzione è illustrato in (Erzeberger, 2006).

I conflitti che coinvolgono più di due aerei hanno molta probabilità di verificarsi in aree ad alta densità di traffico (Frazzoli, Mao, Oh, & Feron, 2001). Anche se nel sistema attuale di traffico aereo più di due aeromobili sono raramente direttamente in conflitto tra loro, i conflitti indiretti sono possibili, dato che la soluzione del conflitto che coinvolge una coppia di velivoli è in grado di generare un conflitto secondario con terzi velivoli prossimi. Dal momento che la densità del traffico dovrebbe aumentare enormemente nei prossimi anni, nel futuro sistema del traffico aereo molteplici conflitti possono sorgere. Un'indagine globale di rilevamento dei conflitti e di metodi di risoluzione è illustrata in (Kuchar & Yang, 2000).

La progettazione di un algoritmo di separazione dovrà avere il difficile compito di soddisfare importanti requisiti:

- Affidabilità: tutti i potenziali conflitti devono essere risolti;
- Efficienza: le strategie di risoluzione devono essere calcolate in un arco di tempo ragionevole;
- Capacità: deve essere garantita la gestione di un gran numero di

aeromobili.

Inoltre, tale algoritmo dovrà risolvere le situazioni di conflitto, badando a che la soluzione non crei nuovi conflitti ed evitando di generare così una reazione a catena di nuovi conflitti. Un'altra importante caratteristica di tale sistema dovrà essere la minimizzazione dello scostamento dal profilo nominale di missione per ogni velivolo.

La risoluzione dei conflitti tra i diversi aerei è un problema combinatorio di elevata complessità. La sua soluzione può essere o di tipo centralizzato o decentralizzato (Clark, Rock, & Latombe, 2003) (Erdmann & Lozano-Perez, 1987).

In un regime centralizzato, si possano trovare soluzioni che siano complete ed ottimizzate a livello globale, ma di solito sono così computazionalmente onerose da non essere efficaci per applicazioni real-time.

In un sistema di gestione decentralizzato ogni aeromobile determina la sua traiettoria individuale di risoluzione in modo indipendente, in linea di principio, utilizzando diverse strategie. Tecniche di questo tipo possono adoperare un ordine di priorità per ciascuno degli aerei in conflitto, semplificando il problema di risoluzione dei conflitti (Irvine, 2009). In questi casi, sono definiti criteri di priorità (di solito su base euristica) e le soluzioni non sono più (globalmente) ottime. Ecco perché le tecniche di tipo decentralizzato sono in generale incomplete, nel senso che potrebbero non riuscire a trovare una soluzione anche se questa esiste. Comunque, nonostante questa perdita di completezza, la drastica riduzione della complessità rende queste strategie una valida alternativa ai sistemi centralizzati.

Un possibile approccio si potrebbe basare su un modello distribuito (decentralizzato) e cooperativo, ma senza assegnare alcuna priorità. In tal caso, tutti gli aerei dovrebbero essere equipaggiati con lo stesso algoritmo e ciascun aeromobile coinvolto nel conflitto dovrebbe calcolare una traiettoria libera da conflitti. Tale approccio si basa sull'ipotesi che tutti gli aerei sono in grado di rilevare gli altri, in un determinato intervallo di tempo, e comunicare agli altri velivoli il proprio stato ed eventuali intenzioni di manovra.

Oltre alla divisione tra algoritmi centralizzati ed algoritmi distribuiti, i diversi approcci presenti in letteratura si possono categorizzare in base al loro orizzonte temporale di applicazione: *Long Term* - orizzonte di ore, problemi di gestione del flusso (Bertsimas & Odoni, 1997) (Andreatta & Brunetta, 1998) - *Mid Term* - orizzonte di decine di minuti (Hu, Prandini, Nilim, & Sastry, 2002) (Frazzoli, Mao, Oh, & Feron, 2001) - e *Short Term* (orizzonte di minuti). Sebbene si possa pensare che la risoluzione del problema su di un orizzonte molto lungo possa essere l'approccio ideale, l'incertezza derivante dal dominio stesso del controllo del traffico (errori nelle previsioni meteo, azioni del pilota, errori nella definizione del modello, etc.) possono portare a soluzioni molto conservative, o anche a soluzioni non convergenti, nel caso di orizzonti temporali molto ampi (Chaloulos, Roussos, Lygeros, & Kyriakopoulos, 2008).

Al contrario, soluzioni per orizzonti di tempo molto brevi tendono ad essere "miopi", ignorando l'obiettivo degli aerei. Per queste ragioni alcuni lavori recenti tentano di integrare queste categorie, al fine di ottenere soluzioni più sicure ed efficienti.

Un trade-off interessante è presentato in un recente articolo (Chaloulos, Roussos, Lygeros, & Kyriakopoulos, 2008): usando tecniche recenti nel campo della robotica e dei controlli, gli autori usano funzioni di navigazione per risolvere conflitti che si presentano nel breve termine (collision avoidance), mentre nel medio termine, un modello predittivo si assicura che il sistema rispetti i vincoli operazionali della situazione (mantenimento della separazione) massimizzando alcune performance globali del sistema. Entrambi gli algoritmi si basano su di uno

schema distribuito e, sebbene il sistema sia stato progettato per aeromobili autonomi (Cuevas, et al., 2009), esso può essere tenuto in considerazione anche per soluzioni adatte a voli operati da piloti umani.

## **2.2 Il progetto ARCA**

Un approccio innovativo al problema della separazione tra aeromobili in generale ed UAS nello specifico è quello proposto all'interno del progetto Europeo denominato ARCA (Adaptive Routing and Conflict management for unmanned Aircraft vehicles, [www.dblue.it/?post\\_type=post&p=146](http://www.dblue.it/?post_type=post&p=146)), su cui si è basata una parte importante della mia ricerca nel primo biennio di Dottorato.

Questo progetto, finanziato dalla Commissione Europea all'interno del programma Eurostars ([www.eurostars-eureka.eu/](http://www.eurostars-eureka.eu/)), si è posto come obiettivo quello di sviluppare un sistema di volo per un UAS in grado di guidare l'aereo verso una specifica destinazione, modificando la sua traiettoria di volo ed adattandosi a un'ampia varietà di situazioni esterne (condizioni meteo, malfunzionamenti), mantenendo costantemente la separazione con gli altri aerei.

In uno spazio segregato questo sistema permette ad un UAS di separarsi dai suoi pari coordinandosi con essi e risolvendo in modo autonomo possibili conflitti di traiettorie.

Il sistema proposto offre le stesse capacità in spazi aerei non segregati, garantendo la separazione con gli aerei commerciali. Questa soluzione prevede ovviamente che tutti gli aerei coinvolti (UAS e tradizionali) siano equipaggiati con adeguati sistemi di comunicazione delle informazioni di navigazione, come ad esempio l'ADS-B<sup>12</sup>, strumento di rilevazione e comunicazione di dati GPS attualmente montato ed in uso sulla gran parte dei voli commerciali (Stamper, 2005).

E' interessante notare come gli obiettivi del progetto prevedano lo sviluppo di tecnologie che aumentino l'autonomia decisionale degli UAS, scelta che può

---

<sup>12</sup> Automatic Dependent Surveillance - Broadcast

apparire in contrasto con le indicazioni generali fornite dall'ICAO riguardo gli UAS autonomi, già illustrate nel capitolo precedente.

La scelta di agenti autonomi come caso d'uso del progetto è motivata da due considerazioni generali: per prima cosa ARCA è stato un progetto prettamente di ricerca e non strettamente legato alle esigenze operative presenti o di un prossimo futuro, che si è posto l'obiettivo di proporre soluzioni per uno scenario di applicazione in cui siano contemplate missioni di UAS autonomi; in seconda istanza è opportuno rimarcare che, nel periodo in cui il progetto è stato proposto ed accettato, ovvero nel 2008, la discussione riguardo l'introduzione di agenti UAS autonomi era ancora piuttosto aperta, non avendo ancora l'ICAO fornito le indicazioni restrittive a riguardo, raccolte nella Circolare 328.

Nel seguito del lavoro si potrà osservare come le conclusioni riguardo l'auto-separazione di UAS autonomi maturate nel progetto ARCA possono fornire importanti indicazioni anche per lo studio dell'integrazione degli RPAS, con importanti ricadute sulle questioni che intende approfondire il mio lavoro di ricerca.

### **2.3 L'algoritmo ARCA**

Il contributo fondamentale ed innovativo offerto dal progetto ARCA è un algoritmo distribuito e collaborativo per l'auto-separazione di agenti autonomi, nello specifico UAS, basato sull'applicazione di metodi basati sulla Teoria dei Giochi a Sistemi a Molti Agenti (Stirling, 2003) (Wolpert & Tumer, 2006).

La scelta di un tale approccio matematico si basa su alcune considerazioni qualitative riguardanti il problema che si desidera affrontare. In particolare esso si dimostra particolarmente indicato per generare ed analizzare modelli di situazioni reali nelle quali si possano definire entità autonome, ciascuna delle quali persegue un proprio obiettivo individuale, ed al tempo stesso sia necessario ottimizzare una qualche misura di efficienza del sistema nel suo complesso.

Nel caso in esame le entità autonome sono i singoli aeromobili, il loro obiettivo è raggiungere un punto di arrivo, minimizzando in primis il rischio di collisioni con altri aeromobili ed in seconda battuta le deviazioni rispetto alla traiettoria ottimale, ovvero quella rettilinea congiungente punto di origine e destinazione.

L'obiettivo di ottimizzazione globale è quello di ridurre al minimo la somma dei ritardi accumulati dai singoli aerei nel raggiungere la loro meta finale.

L'algoritmo sviluppato in ARCA è un'evoluzione di SGT (Satisficing Game Theory) , un approccio già utilizzato con successo in letteratura per affrontare problemi di auto-separazione aerea (Archibald, Hill, Jepsen, Stirling, & Frost, 2008) (Hill, Johnson, Archibald, Frost, & Stirling, 2005), ma anche di logistica e traffico veicolare (Stirling, 2003).

Nel seguito del paragrafo verrà descritta informalmente la logica alla base dell'algoritmo in questione, mentre per una descrizione matematica formale si rimanda alla Appendice A di questo elaborato ed a (Bellomi, Bonato, Nanni, & Tedeschi, 2008).

Ad ogni step dell'algoritmo ogni agente UAS coinvolto è in grado di conoscere posizione, direzione attuale, destinazione, velocità dei suoi "vicini", in un intorno definito dal range di ricezione/trasmisione del transponder di classe S (Stamper, 2005). E' infatti tramite quest'ultimo, e più specificatamente per mezzo del protocollo ADS-B, che i singoli agenti sono in grado di scambiare i dati GPS con i propri "vicini", siano essi altri UAS od aerei tradizionali.

Dopo aver raccolto i dati provenienti dagli altri agenti "visibili", ogni UAS è in grado di valutare quale tra alcune scelte discrete è la più conveniente in relazione all'attuale condizione. Le scelte a disposizione sono sul piano orizzontale (vira decisamente a sinistra di 10°, vira lievemente a sinistra di 5°, prosegui dritto, vira lievemente a destra di 5°, vira decisamente a destra di 10°) e sul piano verticale (sali di un livello di volo, ovvero 1000 piedi, oppure discendi della stessa quota). E' importante notare che la possibilità di eseguire manovre di cambio livello in un algoritmo basato sulla Satisficing Game Theory non era mai stata contemplata in

letteratura, si tratta dunque di una innovazione importante per l'utilizzo di questo approccio in ambito aeronautico.

Alla base delle scelte operate dall'algoritmo ARCA vi sono due funzioni, dette funzioni di utilità: queste funzioni sono chiamate *rejectability* e *selectability* e la convenienza di una scelta rispetto alle altre è ottenuta mediando tra loro. Nello specifico si possono definire informalmente le due funzioni come segue:

- la *rejectability* per ogni opzione misura la possibilità di incorrere in sotto-separazioni (infrazione dei limiti di separazione) con altri agenti nel caso in cui si decida di proseguire nella direzione ad essa associata, quindi è in qualche modo legata al concetto di *safety*;
- la *selectability* misura la convenienza associata ad una determinata scelta in termini di minimizzazione dello spazio percorso, essa è dunque associata alle performance del sistema in termini di ritardi accumulati.

La *rejectability* è calcolata da ogni agente in maniera piuttosto semplice, confrontando la proiezione geometrica del proprio vettore velocità con quella degli altri agenti visibili, individuando così possibili sotto-separazioni (cfr. Appendice A).

La logica alla base *selectability* è invece più interessante: essa è la combinazione di due distinte componenti denominate *base selectability* e *parent selectability*.

La *base selectability* è piuttosto semplice, poiché si basa unicamente sul confronto tra le opzioni direzionali ed il percorso minimo, in altre parole essa è maggiore per le opzioni direzionali che conducono l'agente in questione verso la traiettoria rettilinea che lo collega con la propria destinazione.

La *parent selectability* è più complessa ed è ottenuta da ogni agente  $A_i$  del sistema attraverso i seguenti passi:

- $A_i$  ordina i propri vicini in base ad una funzione priorità, che può essere definita in diversi modi. In ARCA essa è direttamente proporzionale al ritardo accumulato dal vicino in questione fino all'istante presente, dunque

un ritardo maggiore determina una maggiore priorità. L'insieme degli agenti con priorità maggiore di  $A_i$  è definito il *Priority Set* di  $A_i$ .

- Per tutti gli elementi del suo *Priority Set*, detti anche *parents*,  $A_i$  determina gli effetti che le proprie scelte possano avere su di essi: conoscendo la destinazione finale dei propri vicini,  $A_i$  è in grado di determinare quale opzione direzionale, tra quelle a propria disposizione, interferisca il meno possibile con la traiettoria ideale di ognuno dei propri *parents*. Combinando queste informazioni  $A_i$  è in grado di calcolare quale delle proprie possibili scelte è quella che più di tutte favorisce gli appartenenti al proprio *Priority Set* (cfr. Appendice A per i dettagli riguardanti l'implementazione di questa funzionalità).

Nel diagramma seguente è mostrato sinteticamente in forma grafica il flusso dell'algoritmo:

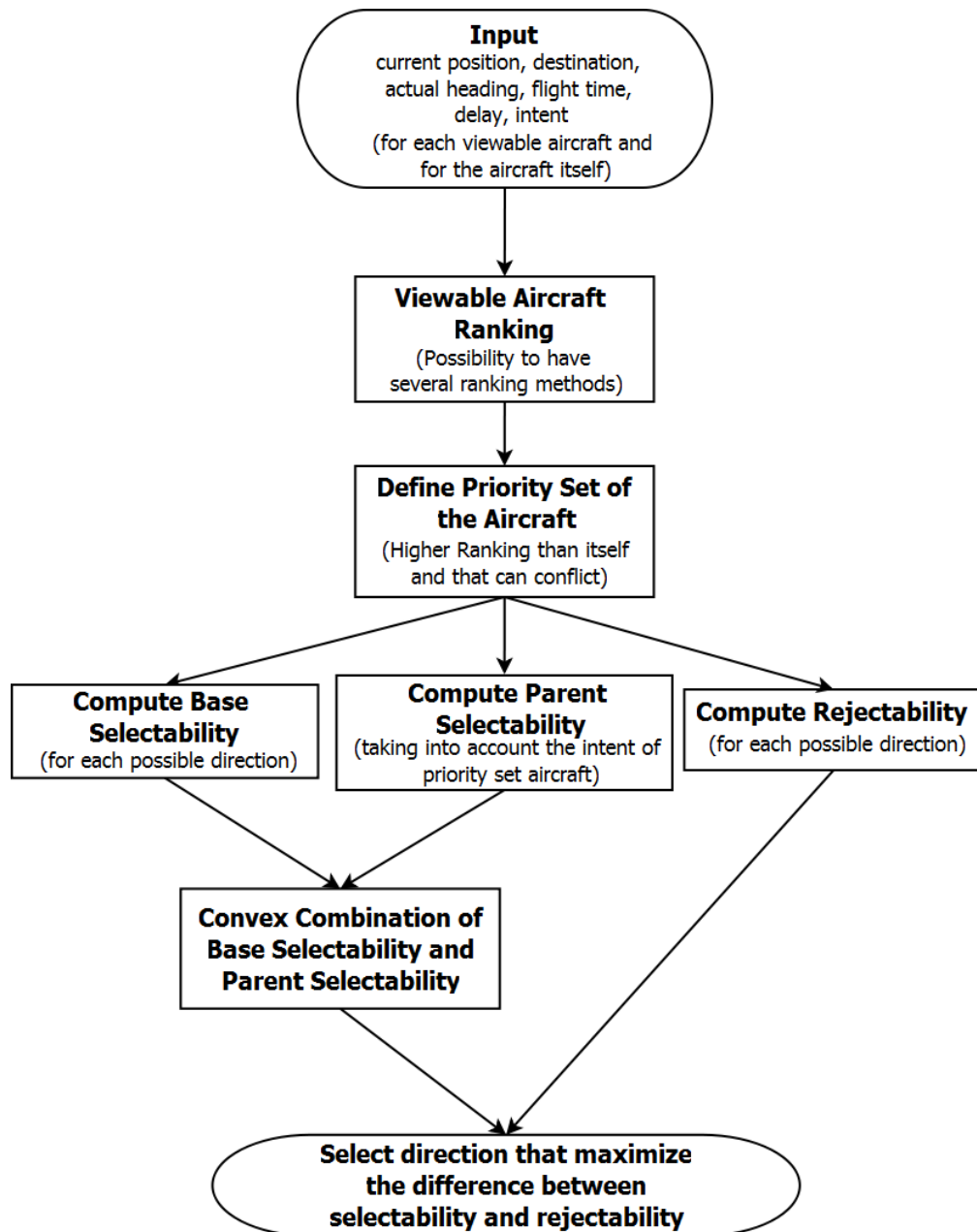


Figura 6: diagramma di flusso dell'algoritmo ARCA

Si può affermare informalmente che, mentre la rejectability e la base selectability esprimono l'obiettivo individuale di ogni agente di viaggiare in sicurezza e di raggiungere al più presto la propria destinazione, la parent selectability esprime l'"altruismo" di ogni singolo agente, ovvero il desiderio del singolo di migliorare

le performance globali dell'intero sistema, concedendo una forma di precedenza agli agenti che abbiano già accumulato un ritardo maggiore del proprio.

La proprietà ottenuta in questo caso è la *fairness*, che possiamo esprimere come equità tra gli agenti coinvolti. Definendo diverse forme di priorità è possibile modellare differenti caratteristiche (come ad esempio la possibilità di garantire la precedenza ad alcuni tipi di agente rispetto ad altri).

Le logiche appena descritte permettono di introdurre alcune importanti considerazioni.

Per prima cosa ogni agente coinvolto è **indipendente** rispetto a tutti gli altri, ovvero è in grado di effettuare le proprie scelte senza necessità di coordinarsi esplicitamente con i propri vicini. Il processo decisionale è dunque **distribuito** e non necessita di una unità centrale che lo coordini (Taurino, Taraglio, Tedeschi, Pasquini, & Nanni, Satisficing Game Theory for Enhancing Autonomy in Unmanned Aerial Vehicles, 2011).

Si può poi osservare che le scelte effettuate dai singoli agenti UAS coinvolti sono il frutto di un processo deterministico basato su un semplice insieme di regole, che agiscono su un sottoinsieme locale del dominio, delimitato dal range di ricezione del transponder classe S.

Queste considerazioni rimandano alla teoria dei sistemi complessi, laddove la capacità globale del sistema di adattarsi a differenti condizioni di traffico, partendo da semplici comportamenti elaborati dai singoli agenti che esplorano uno spazio locale, è l'espressione di una proprietà emergente del sistema stesso.

Nelle sezioni seguenti verranno illustrati ed analizzati alcuni risultati di simulazioni in diverse condizioni ambientali che mostreranno la bontà della soluzione globale fornita dall'algoritmo ARCA al problema della separazione nell'ambito del traffico aereo, con particolare riferimenti agli UAS.

## 2.4 Implementazione a bordo di un UAS reale

Gli obiettivi scientifici e tecnologici del progetto ARCA sono stati lo sviluppo dell'algoritmo dedicato descritto precedentemente, lo studio di fattibilità di un suo utilizzo su di un UAS reale e la realizzazione di un prototipo integrato e funzionante.



Figura 7: UAS HAES 400, modello di riferimento fornito dal partner ceco Evolving Systems Consulting

Allo scopo di realizzare il sistema integrato è stata sviluppata a bordo di un UAS reale una componente software di auto-pilotaggio (realizzata dal partner ceco ESC), in grado di eseguire le manovre suggerite da una componente software di implementazione dell'algoritmo ARCA (da me sviluppata). La comunicazione tra UAS è demandata ad un modulo di comunicazione ADS-B realizzato dal partner spagnolo ERZIA.

Queste componenti software sono state sviluppate su hardware dedicato e certificato per il volo. Dunque per integrare l'algoritmo ARCA nel prototipo UAS è stato necessario uno sviluppo dedicato basato sulle seguenti attività:

- embedding dell'algoritmo su di una EPU (Embedded Processor Unit) dedicata, basata su processore ARM7, con tutte le necessarie considerazioni riguardo le performance (risorse di memoria e capacità di calcolo) limitate di tale tipo di hardware e gli accorgimenti necessari per la programmazione in ambiente real-time;
- sviluppo del software necessario alla gestione della comunicazione della EPU con le altre componenti del sistema (Autopilot, ADS-B), che si basa su di un bus CAN, in particolare con l'utilizzo del framework CANOpen (Boterenbrood, 2000).

Lo sviluppo su di un dispositivo hardware embedded è il primo tentativo presentato in letteratura di utilizzare un algoritmo basato sulla Satisficing Game Theory in un ambiente real time safety-critical, quale effettivamente è l'avionica di un UAS autonomo (Taurino, et al., 2010). La versione dell'algoritmo ARCA sviluppato sulla EPU è una versione leggermente semplificata e adattata alle caratteristiche del processore utilizzato, ma che implementa tutte le funzionalità precedentemente descritte.

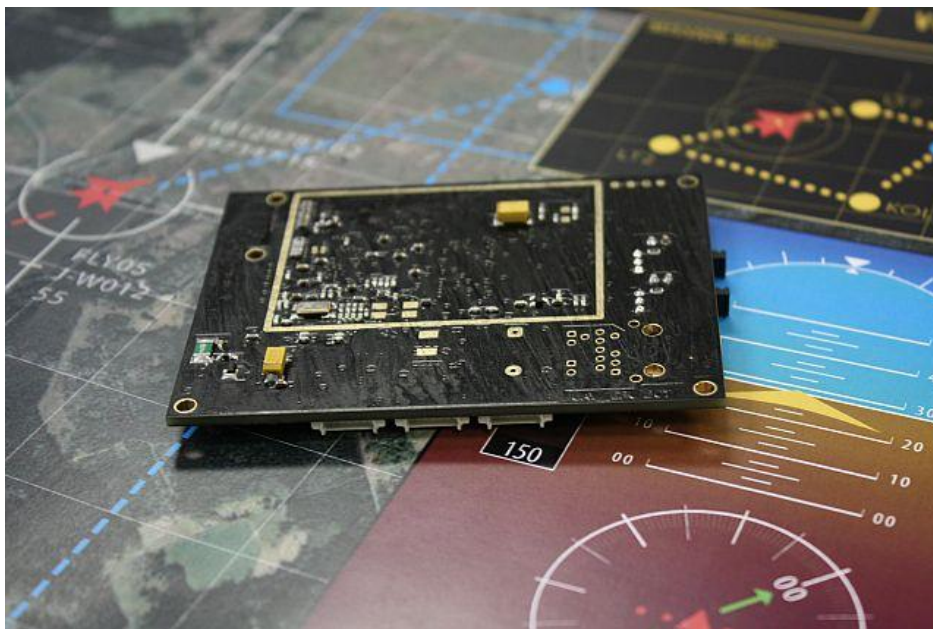


Figura 8: Embedded Processor Unit (EPU) utilizzata per lo sviluppo dell'algoritmo ARCA

Tale versione è stata testata alla frequenza di 1 Hz (ovvero le manovre di risoluzione dei conflitti vengono calcolate ad intervalli di un secondo) e ha dimostrato una efficienza computazionale che permette l'utilizzo in real-time su sistemi con frequenze di calcolo relativamente basse, come l'unità utilizzata nel progetto (125 DMIPS<sup>13</sup>, pari all'incirca alla potenza di calcolo di una CPU Intel Pentium 90) anche per un numero consistente di aeromobili vicini, ai limiti di scenari operativi realistici (più di 20 aeromobili in un raggio di 50 nmi).

## **2.5 Piano di validazione del progetto ARCA attraverso simulazioni**

Allo scopo di dimostrare la validità delle manovre proposte dall'algoritmo e le funzionalità hardware e software del sistema sono state realizzate, in collaborazione con ricercatori dell'ENEA, alcune campagne di simulazione, con crescente livello di complessità (Taraglio, Nanni, & Taurino, Hardware On-Board Implementation Of A Possible Solution To Introduce UAVs Into Non Segregated Areas, 2012) (Taraglio, Nanni, & Taurino, A Safe Solution to Introduce UAVs into Non Segregated Areas, 2011):

- lo scenario più semplice prevede la presenza di soli agenti software simulati in un ambiente Linux, che si muovono seguendo le equazioni del moto di un punto materiale. L'obiettivo di questa prima simulazione era quello di testare le capacità dell'algoritmo in particolari condizioni di traffico (anche distanti da scenari realistici), ma in condizioni ideali di volo (ad es. virata istantanea dell'aereo). Per il dettaglio sugli scenari utilizzati si rimanda a (Taurino, Taraglio, Tedeschi, Pasquini, & Nanni, Increasing the Autonomy of Unmanned Aircraft Veichles with a Game Theory Approach, 2010);

---

<sup>13</sup> Dhrystone MIPS (Million Instructions Per Second), unità di misura utilizzata per il benchmark di processori digitali (Weiss, 2002).

- una simulazione più avanzata è stata svolta introducendo gli agenti autonomi in uno spazio aereo realistico, ricostruito mediante l'utilizzo di un ricevitore ADS-B che permette di conoscere in tempo posizione, rotta e velocità degli aeromobili commerciali che sorvolano la sua zona di copertura. In questo secondo ambiente il moto specifico e le prestazioni degli UAS entrano a far parte della simulazione, mediante l'utilizzo del simulatore di volo open source JSBSim ([jsbsim.sourceforge.net](http://jsbsim.sourceforge.net)), che permette di modellare qualsiasi tipo di aeromobile tramite la configurazione di un grande numero di parametri specifici (aerodinamica, motore, etc.). Lo scopo di questo secondo scenario era quello di testare le capacità di collision detection and resolution in un condizioni geometriche più realistiche (sorvolo reale di aeromobili commerciali), tenendo in considerazione anche le caratteristiche fisiche e la configurazione di volo di un UAS. Nella sezione dedicata alla sperimentazione sono riportati alcuni risultati salienti di questa simulazione;
- una simulazione più complessa e realistica, ovvero i cosiddetti test *hardware-in-the loop*, realizzati cioè in un ambiente realistico come quello descritto nel caso precedente, ma coinvolgendo nella simulazione tutte le componenti hardware che compongono il sistema onboard ARCA: scheda elettronica su cui è implementato l'algoritmo, modulo di controllo dell'UAS con autopilota, modulo ADS-B per la comunicazione con gli altri aeromobile. I principali risultati ottenuti da questa simulazione sono stati due: testare la completa integrazione delle componenti realizzate dai diversi partner (comunicazione sul bus, uniformità dei dati, etc.) e valutare le prestazioni generali del sistema in termini di efficienza e reazioni ad eventuali malfunzionamenti.

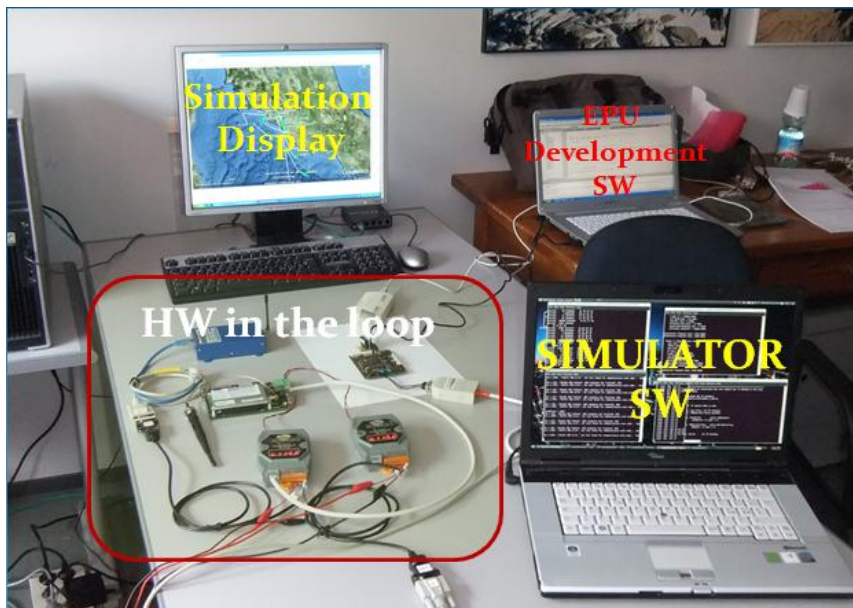


Figura 9: Hardware in the loop test bed

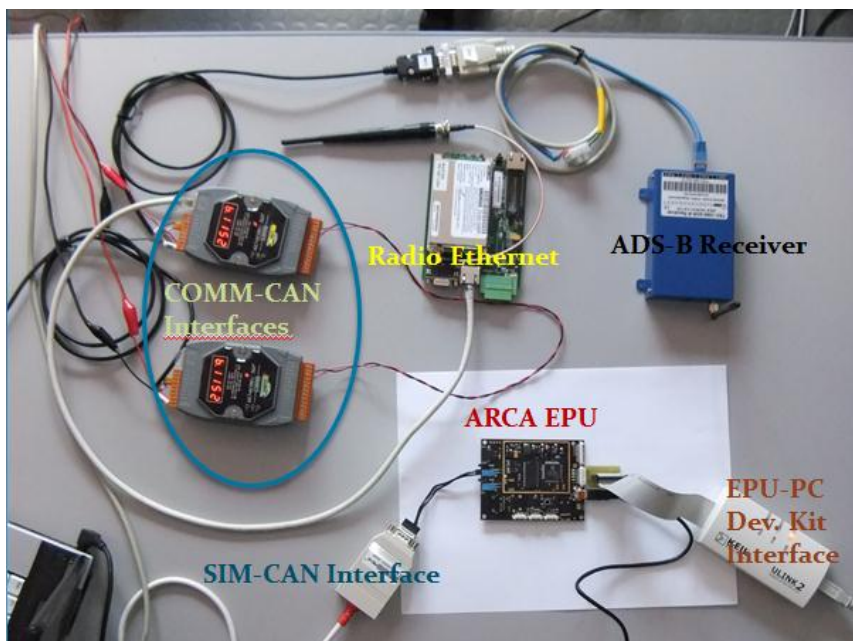


Figura 10: Hardware in the loop test bed, particolare dell'hardware avionico

Al termine del progetto si sarebbe dovuta tenere anche una fase di flight trials in spazi aerei segregati dedicati, tipicamente zone di esercitazione militare. La situazione internazionale (erano in corso le operazioni militari in Libia) e ragioni

di convenienza hanno reso impraticabile questa evenienza, ma in compenso sono state aumentate le risorse dedicate alle simulazioni appena descritte, rendendo più completa ed affidabile questa parte del piano di validazione.

## 2.6 Risultati sperimentali dell'algoritmo ARCA

Uno dei principali obiettivi delle simulazioni effettuate nell'ambito del progetto è stato quello di misurare l'effettiva efficacia dell'algoritmo ARCA in diverse condizioni di traffico, sia esclusivamente unmanned che "misto".

Per entrambi gli ambienti sono state definite alcune strategie decisionali che permettono la valutazione di tutte le possibili manovre a disposizione, orizzontali e verticali, per garantire la separazione ricercando il minor discostamento possibile rispetto alla traiettoria ideale, come descritto dettagliatamente nella Appendice A.

Allo scopo di valutare le performance dell'algoritmo sono stati svolti diversi esperimenti con differenti scenari, durante i quali sono state utilizzate alcune s  
La più importante è, ovviamente, la capacità di garantire la separazione, chiamata Separation Assurance. Essa è calcolata come funzione della densità di traffico variabile in diversi scenari.

Un'altra grandezza di cui si può tenere conto è la System Efficiency, che è definita a partire dalla capacità di ogni aereo di seguire il suo percorso ideale. Allo scopo di misurarla per l'intero sistema, si calcola la media globale:

$$SE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{t_i + t_{d_i}}$$

Dove N è il numero di aerei,  $t_i$  è il tempo di volo ideale per l'aereo i e  $t_{d_i}$  è il tempo aggiuntivo di ritardo.

Le manovre di risoluzione dei conflitti causeranno la deviazione degli aerei dal loro percorso ideale, aumentando i costi ed accumulando ritardi. Affinché un algoritmo sia valido i conflitti dovrebbero essere evitati mantenendo un elevato livello di efficienza.

Durante i test di simulazione sono stati utilizzati scenari considerati in letteratura molto impegnativi per gli algoritmi di Collision Detection and Resolution, che verranno introdotti e commentati nelle sezioni seguenti.

### **2.6.1 Risultati in ambiente esclusivamente unmanned**

Le prime simulazioni sono state svolte assumendo che gli agenti coinvolti fossero esclusivamente unmanned e volassero dunque in uno spazio aereo segregato e dedicato. In questo caso dunque tutti gli agenti sono collaborativi e l'algoritmo viene utilizzato esclusivamente per mantenere la separazione tra UAS. Per tutti gli esperimenti in cui sono coinvolti più di due UAS, due di essi sono realizzati hardware-in-the-loop, mentre gli altri sono emulati via software.

L'obiettivo di queste simulazioni è stato quello di analizzare alcune metriche importanti per l'algoritmo e di confrontarle con alcuni risultati noti in letteratura. In realtà nella letteratura scientifica non sono presenti molte pubblicazioni che esibiscano valutazioni di algoritmi di collision detection and resolution su un orizzonte temporale di decine di minuti, necessario per affrontare il problema del mantenimento della separazione.

Come già detto in precedenza l'applicazione di un approccio di risoluzione globale e distribuito con manovre in 3 dimensioni è del tutto innovativo, per questo si è deciso di procedere per passi successivi:

- per prima cosa è stato testato intensivamente l'algoritmo in 2 dimensioni perché fosse possibile confrontarne le performance con risultati noti in letteratura;
- in seconda battuta è stato testato l'algoritmo in 3 dimensioni per cui non sono reperibili in letteratura risultati confrontabili.

#### **2.6.1.1 Algoritmo in 2D**

Durante questi test di simulazione sono stati utilizzati scenari considerati in letteratura probanti per gli algoritmi di Collision Detection and Resolution.

Il primo scenario proposto è il cosiddetto "Random Square", ovvero una situazione in cui gli agenti UAS vengono generati nel corso della simulazione su

di un lato di un quadrato e devono raggiungere una destinazione generata casualmente sul lato opposto.

Per dimostrare ed analizzare le performance dell'algoritmo ARCA vengono qui presentati il valor medio e la deviazione standard delle mancate separazioni (indicatore associato alla Separation Assurance) e della System Efficiency al variare del numero di UAS coinvolti, calcolate su 30 simulazioni differenti per ogni esperimento.

Le condizioni iniziali invarianti di ogni esperimento sono: lato del quadrato di 100 nmi, velocità di 120 nodi (velocità massima raggiunta dall'UAS di riferimento per il progetto) e vettore delle opzioni direzionali pari a  $[-10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ]$  per ogni UAS.

Nel seguente grafico sono mostrati i risultati ottenuti messi a confronto con quelli proposti da Archibald et al. in (Archibald, Hill, Jepsen, Stirling, & Frost, 2008) (in cui la deviazione standard non è presentata):

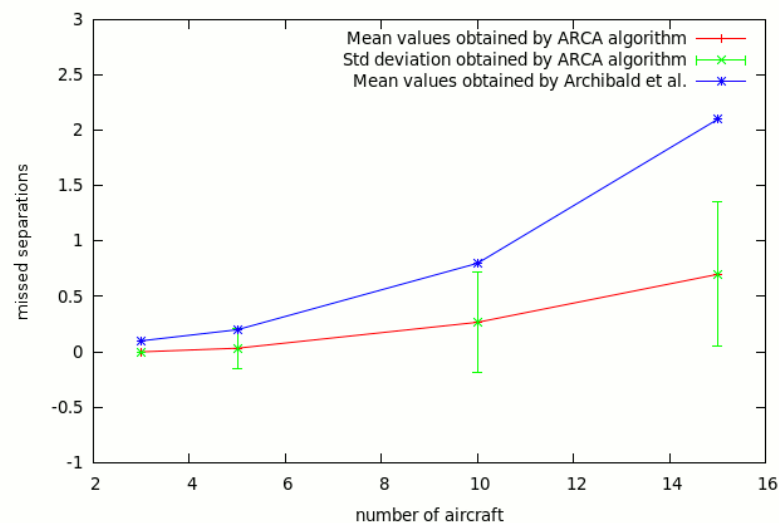


Figura 11: Valor medio e deviazione standard delle mancate separazioni al variare del numero di UAS nello scenario Random Square

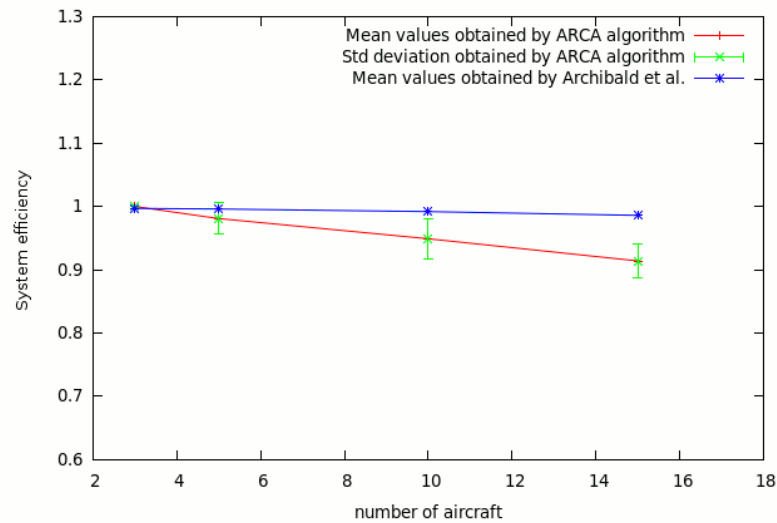


Figura 12: Valor medio e deviazione standard della System Efficiency al variare del numero di UAS nello scenario Random Square

I risultati ottenuti dall'algoritmo ARCA sono migliori in termini di Separation Assurance, raccogliendo un minor numero di mancate separazioni (<1 per 15 UAS, contro >2 in (Archibald, Hill, Jepsen, Stirling, & Frost, 2008)).

La System Efficiency globale è invece minore, mantenendo comunque un valore ancora paragonabile.

Le tecniche utilizzate in (Archibald, Hill, Jepsen, Stirling, & Frost, 2008) sono sostanzialmente assimilabili a quelle di ARCA, basate sulla Satisficing Game Theory, ma i risultati sottolineano una importante differenza tra i due approcci utilizzati. Il focus principale di ARCA è la safety, espressa in termini di riduzione del numero di mancate separazioni. Questa considerazione si traduce in alcune accortezze implementative che sostanzialmente permettono di tenere in maggior considerazione la funzione rejectability durante il calcolo (aumentando ad esempio il valore del parametro  $\lambda$ , dettagliato in Appendice A). Nel lavoro di Archibald et al. l'obiettivo principale è invece quello di massimizzare l'efficienza globale del sistema, a parziale discapito della Separation Assurance.

Alla luce di queste considerazioni un risultato migliore in termini di sicurezza, a fronte di una degradazione graduale dell'efficienza del sistema, è considerato un risultato soddisfacente alla luce degli obiettivi del progetto ARCA.

E' importante notare come lo scenario appena presentato sia in realtà molto distante da normali condizioni operative, ma è una configurazione artificiale utilizzata proprio allo scopo di testare intensivamente l'algoritmo in condizioni limite.

Un ulteriore scenario considerato in letteratura una sfida importante per gli algoritmi di collision detection and resolution è il cosiddetto "Choke Point", in cui gli aerei sono distribuiti lungo una circonferenza ed ognuno di loro punta a raggiungere il punto esattamente all'opposto della circonferenza. Nei grafici seguenti sono mostrate le stesse metriche dello scenario precedente, con le stesse condizioni iniziali per gli aeromobili ed una circonferenza di riferimento di raggio uguale a 60 nmi. In questo caso i diversi esperimenti si differenziano tra loro per la distribuzione iniziale dei valori di priorità, assegnata casualmente all'inizio di ogni simulazione.

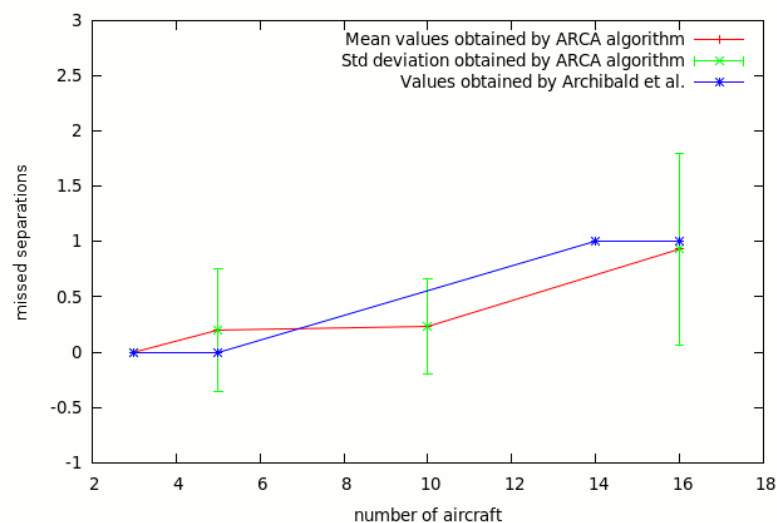


Figura 13: Valor medio e deviazione standard delle mancate separazioni al variare del numero di UAS nello scenario Choke Point

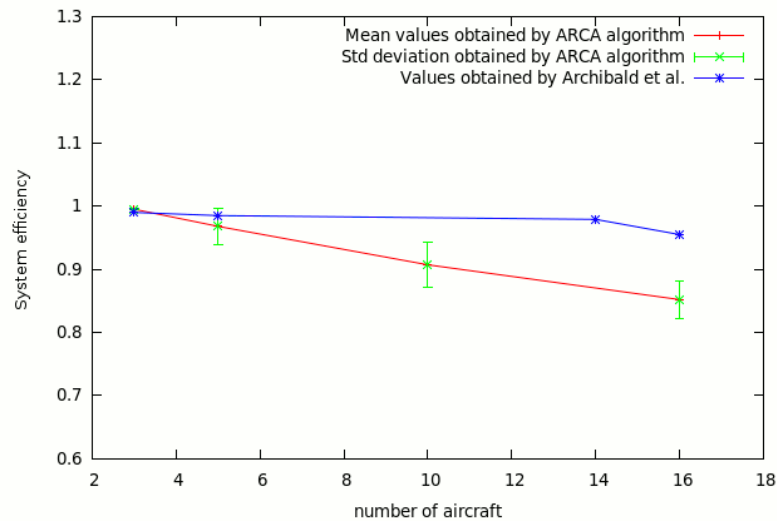


Figura 14: Valor medio e deviazione standard della System Efficiency al variare del numero di UAS nello scenario Choke Point

Anche in questo caso il livello di safety garantito dall'algoritmo ARCA risulta leggermente migliore, pur mantenendo discrete performance in termini di System Efficiency.

Nel paragrafo seguente si vedrà come l'utilizzo di un algoritmo con la possibilità di eseguire manovre in 3 dimensioni migliori decisamente le proprietà del sistema.

### 2.6.1.2 Algoritmo in 3D

Dopo aver testato l'algoritmo in 2 dimensioni e averne confrontato le performance con i risultati in letteratura, si è passato ad analizzare i risultati forniti dalla sua versione integrale in 3 dimensioni.

Non essendo possibile reperire in letteratura risultati con cui confrontarsi, l'analisi è stata effettuata basandosi sulle differenze rispetto al caso in 2 dimensioni. Facendo riferimento allo scenario Choke Point, che si è mostrato il più impegnativo in termini di garanzia di separazione, la seguente tabella riassume i risultati numerici delle simulazioni eseguite con una circonferenza di 60 miglia nautiche, già presentati precedentemente in forma grafica:

Aircraft number	Missed Separations		System Efficiency	
	Mean	Std. Dev.	Mean	Std. Dev.
3	0,000	0,000	0,993	0,008
5	0,000	0,000	0,978	0,008
10	0,000	0,000	0,914	0,016
15	0,000	0,000	0,877	0,034

**Tabella 1:** ARCA algorithm performance in 'Choke Point 2D' scenario (30 measurements, circle radius = 60 nautical miles, speed = 120 knots, directional option = [-10°, 5°, 0°, 5°, 10°])

Allo scopo di testare la soluzione 3D, sperimentazioni identiche sono state condotte, con gli aerei posizionati inizialmente allo stesso livello di volo (FL80), ma lasciati liberi di variare il livello durante il volo, seguendo le indicazioni fornite dall'algoritmo.

Aircraft number	Missed Separations		System Efficiency	
	Mean	Std. Dev.	Mean	Std. Dev.
3	0,000	0,000	0,993	0,008
5	0,000	0,000	0,978	0,008
10	0,000	0,000	0,914	0,016
15	0,000	0,000	0,877	0,034

**Tabella 2:** ARCA algorithm performance in 'Choke Point 3D' scenario (30 measurements, circle radius = 60 nautical miles, speed = 120 knots, directional option = [-10°, 5°, 0°, 5°, 10°])

Come prevedibile, la possibilità di risolvere i conflitti anche sul piano verticale migliora la capacità di risoluzione dell'intero sistema: nel caso 3D le simulazioni che coinvolgono fino a 15 UAS risultano del tutto prive di violazioni di separazione ed anche il parametro di efficienza globale del sistema risulta migliore. Nel caso di 3 e 5 aerei il risultato è del tutto identico a quello prodotto dal caso 2D perché in queste configurazioni non è stato necessario alcun cambio di livello per mantenere la separazione.

Questi risultati sono molto interessanti e testimoniano la capacità dell'algoritmo di garantire la separazione tra tutti gli aeromobili, anche in condizioni di traffico estremamente congestionato, mantenendo un accettabile livello di performance del sistema, intorno al 90% dell'efficienza rispetto alla condizione ideale, in cui nessun aeromobile interagisce con gli altri.

Questi risultati incoraggianti, ottenuti nel caso in cui tutti gli agenti hanno le stesse capacità ed ognuno esegue a bordo l'algoritmo ARCA, ci hanno spinto a testare la stessa soluzione in un ambiente misto, composto da agenti eterogenei, con caratteristiche e comportamenti molto diversi tra loro. Nella sezione seguente verranno presi in esame i risultati delle simulazioni che coinvolgono UAS ed aerei commerciali, che condividono lo stesso spazio aereo.

### **2.6.2 Risultati in ambienti misti manned-umanned**

Esperimenti simili a quelli presentati fino ad ora sono stati portati a termine anche per scenari di integrazione in spazi aerei non segregati. Questo significa che nelle simulazioni sono stati inclusi, oltre ad agenti UAS simulati, anche aerei commerciali "non collaborativi", ovvero impegnati nelle loro normali operazioni di volo.

E' stato possibile ricostruire delle tracce realistiche di aerei commerciali a partire dal loro segnale ADS-B, ricevuto a terra tramite una antenna specifica. Sono stati effettuati in questo modo dei test in "tempo reale", coinvolgendo aerei commerciali che attraversavano effettivamente lo spazio aereo nel momento della simulazione. Questa scelta permette di svolgere le sperimentazioni in un ambiente il più possibile realistico ed assimilabile alla realtà operativa. La zona scelta è l'area di avvicinamento ad un grande aeroporto, in modo tale da avere a disposizione una grande mole di traffico commerciale con cui testare intensivamente le capacità dell'algoritmo.

In Figura 15 è riportata una istantanea dell'interfaccia grafica realizzata all'interno del progetto allo scopo di visualizzare le tracce degli aerei coinvolti nella simulazione basandosi sulle mappe satellitari fornite da Google Earth ([earth.google.com](http://earth.google.com)). Nello specifico l'area geografica interessata è quella dell'aeroporto di Fiumicino, sono rappresentati in rosso gli UAS simulati e in blu gli aerei commerciali visibili dal ricevitore ADS-B di terra.

Il circolo verde ha un raggio di 2,5 nmi, cosicché che la separazione tra gli aerei è garantita finché due circoli non si intersecano.



Figura 15: Simulazione dell'introduzione di UAS in uno spazio aereo non segregato

La condizione iniziale di questo esperimento differisce sostanzialmente rispetto alle simulazioni descritte in precedenza. Come già accennato gli esperimenti in condizioni di traffico misto coinvolgono agenti con caratteristiche di performance e di comportamento molto differenti. Nella tabella seguente sono indicate le principali differenze in termini di caratteristiche e di comportamento tra UAS equipaggiati con algoritmo ARCA (appartenenti alla categoria considerata nel progetto) ed aerei commerciali coinvolti nella simulazione tramite la ricezione dei loro pacchetti ADS-B.

	UAS	Aerei commerciali
<b>Velocità media a terra (GPS)</b>	~120 nodi	~500 nodi (in sorvolo)
<b>Velocità verticale massima</b>	~1000 ft/min	~2000 ft/min
<b>Utilizzo algoritmo ARCA</b>	SI	NO
<b>Priorità</b>	Calcolata con ARCA	MAX (precedenza sugli UAS)
<b>Frequenza ADS-B</b>	Stabile	Non stabile
<b>Freschezza dato GPS</b>	Affidabile	Non affidabile

Tabella 3: Caratteristiche degli agenti coinvolti in simulazioni di traffico misto

Gli aerei commerciali hanno prestazioni di velocità molto maggiori e non collaborano con gli altri agenti, ma rispondono solo alle richieste del Controllo del Traffico Aereo durante il volo. L'algoritmo a bordo degli agenti UAS è parametrizzato in modo che essi considerino la priorità degli aeromobili commerciali sempre maggiore rispetto alla propria e a quella degli altri UAS. Questa caratteristica soddisfa le linee guida fornite dall'ICAO e da altre istituzioni, secondo le quali questa precedenza deve sempre essere garantita.

Una ulteriore differenza tra i due tipi di agenti riguarda l'affidabilità del GPS e del trasmettitore ADS-B. Mentre infatti gli agenti UAS (siano essi hardware-in-the-loop o emulati tramite software) si trovano in un ambiente controllato, gli aeromobili commerciali si trovano a migliaia di distanza. Questo ha delle conseguenze sia sulla disponibilità e freschezza del dato GPS, che sulla frequenza effettiva di invio e conseguente ricezione dei pacchetti ADS-B. Per quanto riguarda il dato di posizionamento GPS, per gli UAS esso viene generato all'interno dell'esperimento di simulazione ed è dunque sempre aggiornato ed affidabile, mentre per quanto riguarda gli aerei commerciali tale freschezza del dato non è garantita dal protocollo ADS-B. Quest'ultimo non dà garanzie neanche riguardo la frequenza con la quale il dato viene inviato in broadcast, che si aggira intorno a 0,2 Hz, mentre per gli UAS simulati all'interno del progetto ARCA tale frequenza è un dato stabile. Se si aggiunge a queste considerazioni un tasso di perdita dei pacchetti provenienti dagli aeromobili commerciali non del tutto trascurabile, si può concludere che la comunicazione tra UAS e traffico commerciale è molto meno affidabile di quella tra UAS.

Queste differenze importanti tra diversi agenti coinvolti aggiunge complessità al sistema e conseguentemente agli esperimenti condotti.

Tutti gli aerei commerciali visibili da terra tramite il segnale ADS-B sono stati ridistribuiti nello spazio aereo della simulazione su 3 livelli di volo: FL90, FL100, FL110, pari rispettivamente ad una altitudine di 9000, 10000 e 11000 piedi. Questa operazione è stata motivata da due ragioni: la prima ragione è che l'algoritmo ARCA allo stato attuale è pensato per garantire la separazione

“enroute”, ovvero nelle fasi di volo che escludono il decollo e l’atterraggio, durante le quali sono previste condizioni operative differenti (obbligo di seguire alcune rotte di avvicinamento predefinite e dipendenti dall’aeroporto in questione, differenti volumi di separazione); la seconda ragione è che, ridistribuendo tutti i voli su 3 soli livelli, il traffico risultante è molto più intenso e dunque permette di testare l’algoritmo con maggiore attendibilità.

Oltre agli aerei commerciali sono stati introdotti 4 UAS (2 hardware-in-the-loop e 2 emulati tramite software) il cui obiettivo era quello di attraversare lo spazio aereo di riferimento, secondo lo schema “Choke Point”, separandosi tra loro e dal traffico commerciale mediante l’utilizzo dell’algoritmo ARCA. Ogni UAS è partito dal livello di volo FL100, con la libertà di cambiare livello durante il volo, fermo restando l’obbligo di rimanere sempre nell’intervallo [9000 ft, 11000 ft].

Le condizioni iniziali dell’esperimento sono riprodotte in Figura 9.

Per ovviare ai problemi di comunicazione accennati precedentemente è stata aumentata del 10% la distanza considerata utile per mantenere la separazione all’interno dell’algoritmo, introducendo così un buffer temporale di sicurezza.

Sono state condotte 10 simulazioni complete, della durata di circa 75 minuti ognuna, in un’area di circa 50 nmi di raggio, coinvolgendo 4 UAS ed una media di 16,1 aeromobili commerciali. Gli UAS hanno effettuato una media di 12,1 cambi di livello, pari a circa 3 ognuno in ogni simulazione.

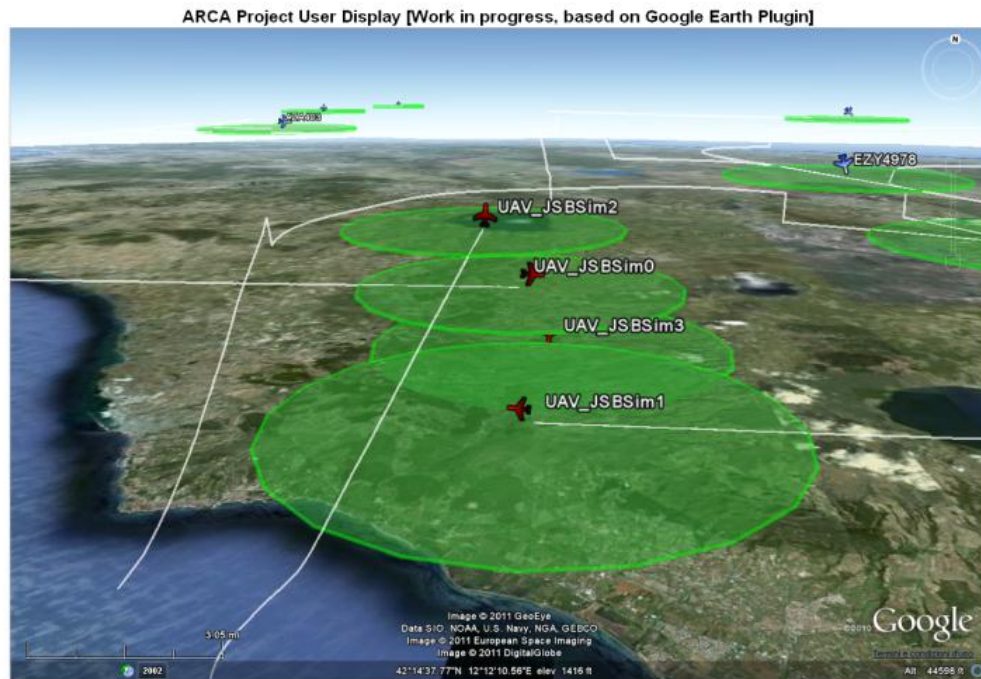


Figura 16: Dettaglio di separazioni operate sui piani orizzontale e verticale tra gli UAS coinvolti nella simulazione. L'andamento "a scalino" degli aerei commerciali è dovuto alla discretizzazione dell'altitudine operata per posizionare tutti gli aerei su 3 livelli.

Il risultato in termini di mancate separazioni è stata una media di 0,4 per ogni simulazione tra UAS ed aerei commerciali, mentre nessuna infrazione dei minimi di separazione è avvenuta tra UAS. La System Efficiency (misurata sui soli UAS) si è attestata intorno ad un valore medio di 0,75.

Un'analisi delle mancate separazioni tra UAS ed aerei commerciali ha portato a concludere che esse si sono verificate perché la differenza di velocità tra i due velivoli ha reso impossibile all'UAS effettuare in tempo una manovra di risoluzione del conflitto. Ciò si è verificato all'inizio della simulazione, quando la disposizione iniziale ha penalizzato l'agente autonomo in termini di distanza dal più vicino aeromobile collidente, oppure durante la stessa, quando un aeromobile commerciale è "comparso" improvvisamente, perché appena decollato dall'aeroporto o perché il suo segnale ADS-B è tornato disponibile dopo un periodo di assenza.

Tali considerazioni sono prettamente qualitative e necessitano di maggiori indagini analitiche e statistiche, ma portano ad una riflessione riguardo

l'opportunità di ritenere che, in un ipotetico scenario operativo futuro di traffico misto tradizionale e pilotato in remoto, le manovre di separazione debbano essere sempre a carico degli agenti UAS. Infatti le prestazioni di questi ultimi possono non essere tali da permettere una risoluzione semplice ed immediata dei conflitti, mentre le performance dei più potenti aerei di linea potrebbero permettere di gestirli in modo più semplice e sicuro. Come vedremo nel seguito della ricerca questo argomento alimenta delle discussioni aperte nella comunità che si occupa dell'integrazione degli RPAS.

I risultati delle simulazioni qui proposte, seppur ancora privi di un rilevante fondamento statistico, costituiscono una conferma importante delle potenzialità di un approccio al problema della gestione della separazione aerea innovativo ed economicamente concorrenziale, poiché distribuito e basato su tecnologie già radicate ed utilizzate nell'ambito dell'aviazione.

L'approccio proposto dal progetto ARCA si è già dimostrato valido nella realizzazione di un prototipo per supportare nella risoluzione dei conflitti piloti di Aviazione Generale ed è in corso un progetto che punta all'integrazione delle tecnologie già parzialmente validate da questo lavoro nella RPS di un RPAS, come sistema di supporto alla decisione per il pilota remoto (Taurino, Frau, Beato, & Tedeschi, 2011).

Durante queste ed altre attività sono state svolte e verranno portate a termine nei prossimi mesi nuove campagne di simulazione, anche in contesti operativi maggiormente definiti e dunque più industrialmente rilevanti, allo scopo di validare e raffinare iterativamente le soluzioni proposte e con l'obiettivo di aumentare l'affidabilità e la maturità tecnologica del promettente approccio presentato in questa ricerca.

Il lavoro svolto nel progetto ARCA e descritto in questo capitolo è risultato molto importante ai fini della mia ricerca. Lavorare su tematiche attuali e particolarmente sentite nell'ambito degli UAS/RPAS come la Collision Detection & Resolution e la auto-separazione mi ha permesso di acquisire una conoscenza del dominio allo stato dell'arte, mentre seguire tutte le fasi di sviluppo di una

applicazione prototipale mi ha portato a confrontarmi con molte delle sfide che si presentano durante il design, l'implementazione e la validazione di nuove tecnologie in ambienti safety-critical. Durante questa fase del lavoro la mia ricerca si è concentrata soprattutto sugli aspetti tecnologici dell'introduzione degli UAS all'interno del sistema del traffico aereo, tramite lo studio e lo sviluppo di una soluzione tecnica in grado di facilitare tale integrazione. Tornando brevemente all'approccio SHELL descritto nel Capitolo 1 di questa tesi, si può affermare che il lavoro fin qui descritto si muove sostanzialmente tra la S di *software* e la H di *hardware*.

Il prossimo capitolo illustrerà come le conoscenze acquisite durante la partecipazione ad un altro progetto di ricerca, il progetto ICONUS, mi abbiano permesso di ampliare la visione sulle tematiche centrali del mio lavoro di ricerca, attraverso un approccio multi-disciplinare orientato ad una visione integrata e sistemica delle problematiche e delle opportunità collegate all'introduzione degli UAS nel sistema socio-tecnico complesso del Traffico Aereo.

### **3. Introduzione degli RPAS nel sistema del Controllo del Traffico Aereo**

Nel capitolo precedente è stata illustrata una soluzione tecnologica al problema della auto-separazione di RPAS all'interno di spazi aerei segregati e non-segregati fondata su un approccio innovativo basato sulla Teoria dei Giochi.

I risultati sperimentali ottenuti durante la campagna di simulazione all'interno del progetto ARCA contribuiscono a definire e sottolineare il potenziale tecnologico collegato all'introduzione degli aeromobili a pilotaggio remoto: la capacità di questi agenti di garantire la propria separazione da altri RPAS in missioni multi-agente e la possibilità di estendere questa abilità in scenari che prevedono operazioni in spazi aerei condivisi con il normale traffico è un requisito che apre la strada a molteplici opportunità ed applicazioni.

E' necessario però sottolineare come, all'interno del progetto ARCA, il problema dell'introduzione degli RPAS sia stato in qualche misura riformulato, tramite assunzioni e semplificazioni. Questo si è reso necessario perché lo scopo del progetto, ovvero quello di sviluppare e testare le capacità di un algoritmo di separazione innovativo, sarebbe stato difficilmente raggiungibile con le risorse e nei tempi preventivati qualora si fosse introdotta una eccessiva variabilità e complessità nelle condizioni del modello utilizzato. Alcuni fattori importanti come l'interazione con i Controllori del Traffico Aereo, il ruolo e i compiti del pilota e dell'equipaggio remoto, le procedure di emergenza, il rispetto di alcune delle regole di volo soprattutto durante le fasi di salita e discesa, decollo ed atterraggio, sono stati estremamente semplificati o addirittura esclusi dalle condizioni iniziali degli

esperimenti. Le considerazioni riguardanti la qualità dei risultati prodotti dall'applicazione dell'algoritmo ad un sistema semplificato restano valide e costituiscono una solida base per la prosecuzione della ricerca nella direzione tracciata dal progetto ARCA, ma altre importanti valutazioni si sono rese necessarie per inquadrare questi risultati in un impianto più ampio, affinché si possa prefigurare una reale applicazione nel dominio operativo di riferimento.

Come già ampiamente anticipato nel Capitolo 1 l'introduzione degli RPAS nel sistema socio-tecnico del traffico aereo è un problema complesso, che richiede un approccio multi-disciplinare ed una visione costante e globale dell'intero sistema, e che consideri le componenti umane, tecnologiche, organizzative ed ambientali come elementi distinti ma interdipendenti, legati da mutue e continue interazioni.

Alla luce di queste considerazioni, dopo aver analizzato nel capitolo precedente il problema della auto-separazione degli UAS/RPAS da un punto di vista prettamente tecnologico ed algoritmico, verrà presentata nel seguito una visione più globale e sistemica del problema, generata a partire dal lavoro svolto nella seconda parte della mia ricerca all'interno del corso di Dottorato e che ha trovato la sua principale applicazione all'interno del progetto ICONUS.

### **3.1 Il progetto ICONUS**

Il progetto ICONUS (Initial CONops for Uas in Sesar), finanziato dalla SESAR Joint Undertaking nel 2012, ha avuto come obiettivo principale la raccolta e la definizione dei principali requisiti che gli UAS/RPAS devono soddisfare affinché possano essere introdotti in maniera sicura ed efficiente all'interno dell'attuale sistema del Traffico Aereo. Particolare attenzione è stata posta anche all'integrazione di tali agenti all'interno del futuro prossimo dell'ATM, così come prefigurato dallo stesso programma SESAR e brevemente descritto nel Paragrafo 1.1.1 di questa tesi.

Nel progetto sono stati coinvolti alcuni dei principali enti di ricerca europei che si occupano di Traffico Aereo (Onera ed ENAC per la Francia, CIRA per l'Italia e INTA per la Spagna), insieme a due Piccole Medie Imprese (Avtech per la Svezia e

Deep Blue per l'Italia) che si occupano di consulenze per l'industria e per gli enti predisposti al Controllo del Traffico Aereo ed hanno una conoscenza operativa del dominio riconosciuta e consolidata da anni. Le competenze dei vari partecipanti sono state selezionate allo scopo di raccogliere uno spettro di conoscenze ampio e multidisciplinare, che permettesse di affrontare il problema mantenendo una visione globale e condivisa fondata su consolidate basi teoriche e scientifiche, pur mantenendo la necessaria aderenza ai concetti operativi che regolano il traffico aereo.

Il lavoro svolto all'interno di ICONUS è stato organizzato seguendo 3 fasi principali: definizione degli scenari, raccolta dei requisiti UAS/RPAS, validazione. Queste fasi sono state distinte al fine di strutturare il lavoro in modo efficace, ma sono in realtà strettamente correlate tra loro, poiché nel processo iterativo di raffinamento dei risultati prodotti da ogni singola fase sono stati utilizzati input e considerazioni provenienti dalle altre.

Nella fase preliminare di definizione degli scenari sono stati prefigurate e dettagliate le possibili operazioni e missioni (militari e civili) che gli UAS/RPAS potranno ragionevolmente svolgere negli spazi aerei in un futuro a breve, medio e lungo termine. A partire dagli scenari sono stati raccolti e dettagliati i principali requisiti che tali nuovi agenti dovranno necessariamente implementare affinché la loro introduzione nel sistema socio-tecnico del Traffico Aereo possa avvenire in modo sicuro ed efficiente, dividendoli per categorie principali: sistemi e tecnologie, standard e regolamentazioni, fattori umani, operazioni. Le fasi di definizione degli scenari e dei requisiti sono state costantemente affiancate e supportate da un piano di validazione che ha previsto diverse fasi di verifica e raffinamento dei risultati prodotti tramite alcune azioni interne al gruppo di lavoro ed un workshop finale con diversi stakeholder ed esperti di UAS/RPAS, che ha permesso una validazione esterna dei risultati ottenuti dal progetto.

Nel seguito verranno descritte più in dettaglio le metodologie utilizzate nelle fasi di definizione degli scenari, di raccolta dei requisiti e di validazione, presentando per

ognuna di esse alcuni dei risultati considerati più interessanti per gli scopi di questa tesi.

### **3.1.1 Definizione degli scenari operativi degli UAS**

La definizione di scenari d'uso è una metodologia spesso utilizzata nelle fasi preliminari della raccolta di requisiti in ambienti complessi (Jarke, Bui, & Carroll, 1998). Uno scenario è generalmente caratterizzato da uno stile descrittivo e può essere utilizzato per descrivere un caso d'uso d'interesse di un determinato strumento. L'utilizzo di scenari narrativi permette di descrivere in linguaggio naturale le aspettative e le necessità dell'utente, che immagina e narra alcuni degli utilizzi principali che può avere un nuovo strumento innovativo a supporto del proprio lavoro quotidiano (Go & Carroll, 2004). Questa metodologia permette dunque agli utenti di esprimere in un linguaggio familiare le proprie necessità agli sviluppatori, mentre questi ultimi acquisiscono importanti nozioni riguardo il reale utilizzo degli strumenti in ambiente operativo. Nella definizione di scenari narrativi in linguaggio naturale è inevitabile l'insorgere di ambiguità, ridondanze e contraddizioni (Rosson & Carroll, 2003). Sarà compito della successiva fase di raccolta dei requisiti la formalizzazione e la definizione univoca delle caratteristiche e delle peculiarità espresse informalmente negli scenari.

All'interno del progetto ICONUS si è deciso di adottare la metodologia della definizione di scenari per fornire un impianto iniziale alla raccolta dei requisiti per l'introduzione degli UAS/RPAS all'interno degli spazi aerei. Poiché gli usi degli Aerei a Pilotaggio Remoto possono essere molteplici e variegati, è stato prodotto un differente scenario per ogni tipo principale di operazione e di missione.

Gli scenari sono stati raccolti da INTA ed ENAC, che partecipano attivamente a numerose campagne e missioni che prevedono l'utilizzo di RPAS, rispettivamente in ambito militare e civile. Gli altri partner hanno in seguito arricchito e verificato la validità degli stessi utilizzando le proprie conoscenze specifiche di dominio.

Per prima cosa le missioni che tipicamente possono essere affidate ad UAS/RPAS, già presentate nel Capitolo 1 di questa tesi, sono state categorizzate come segue in base al rispettivo profilo di volo:

- le *missioni punto-punto*, principalmente utilizzate come volo di trasferimento da un punto di origine verso l'area in cui si svolgono le operazioni, hanno un profilo molto simile alle normali operazioni aeree commerciali, dunque rappresentabile con una traiettoria 4D (paragrafo 1.1.1), chiamata anche *Mission o Business Trajectory*;



Figura 17: Missione punto-punto

- le *missioni di lavoro aereo pianificate*, come ad esempio la sorveglianza dei confini, utilizzano un profilo molto differente dai normali voli commerciali (e dunque non rappresentabile come traiettoria 4D), poiché utilizzano dei circuiti definiti per lungo tempo;

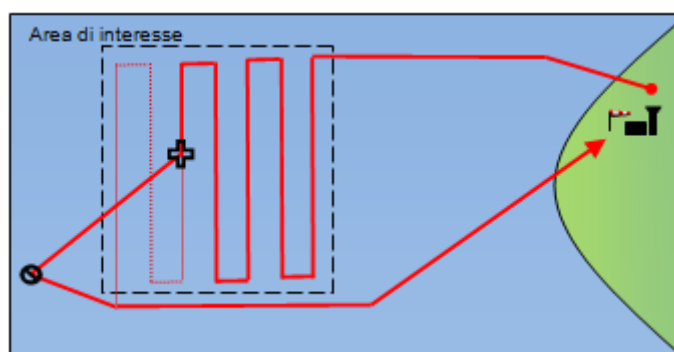


Figura 18: Missione di lavoro aereo

- *le missioni di lavoro aereo non pianificate*, come ad esempio il monitoraggio aereo di un veicolo terrestre o di un convoglio, hanno un profilo di volo del tutto imprevedibile;
- alcune missioni combinano in diverse fasi due o più dei profili di volo fin qui descritte.

A partire da queste considerazioni sono stati definiti 5 scenari per applicazioni civili (volo ad alta quota, volo jet ad altissima quota, volo ad altissima quota per aerei più leggeri dell'aria, volo a media quota, volo a bassa quota, ) e 5 scenari per applicazioni militari (speculari a quelli civili). Ogni scenario rappresenta un esempio di missione caratterizzata da alcune prerogative: categoria di RPAS utilizzato (come da Figura 3), quota di esercizio, modalità (volo strumentale o a vista), classi di spazi aerei attraversati ed altre condizioni operative di interesse. Per ognuno di questi scenari sono state descritte narrativamente le varie fasi della missione (preparazione, decollo, sorvolo, avvicinamento, etc.), prefigurando così l'introduzione degli UAS/RPAS in spazi aerei condivisi. In Appendice B è riportato, a titolo di esempio, uno degli scenari definiti all'interno del progetto. Tutti gli scenari militari e civili sono consultabili nella documentazione tecnica del progetto ICONUS (2012).

Sebbene il mio contributo alla definizione degli scenari sia stato parziale e sostanzialmente limitato ad un compito di revisione, la partecipazione a questa fase del progetto è stata importante perché mi ha permesso da una parte di avere visibilità già dalle fasi preliminari alla raccolta dei requisiti e dall'altra di comprendere i punti di forza e di debolezza della tecnica degli scenari, descritti brevemente nell'introduzione di questo paragrafo.

Il prossimo paragrafo descrive il processo che ha condotto dalla definizione degli scenari di applicazione fin qui analizzati alla raccolta dei requisiti principali per l'introduzione degli UAS/RPAS negli spazi aerei.

### **3.1.2 Raccolta dei requisiti per l'introduzione degli UAS/RPAS nel Traffico Aereo**

La fase di raccolta dei requisiti per l'introduzione degli UAS/RPAS negli spazi aerei ha coinvolto tutti i partner di progetto, che hanno arricchito, ampliato e formalizzato le informazioni raccolte negli scenari con le proprie conoscenze ed esperienze di dominio. Il punto di partenza da cui si è mosso il processo di definizione dei requisiti è stata l'idea che la progressiva introduzione degli UAS/RPAS nel sistema del Traffico Aereo debba avvenire in modo tale da evitare qualsiasi ulteriore modifica al sistema vigente. E' obbligo esclusivo dei nuovi utenti dello spazio aereo, e dunque di chi li produce e di chi ne opera i voli, quello di adattare le proprie procedure e caratteristiche al sistema in esercizio, senza inficiarne in alcun modo il funzionamento, l'efficienza e la sicurezza. In altri termini le indicazioni dell'ICAO, recepite da Eurocontrol e dalla SESAR JU, prevedono che gli UAS/RPAS debbano essere inseriti nel sistema del Controllo del Traffico Aereo in modo del tutto trasparente, che non preveda la modifica o la definizione di nuove procedure o strumenti per l'ATM (ICAO, 2011). Questa considerazione si basa sulla ragionevole assunzione che l'introduzione di un nuovo utente dello spazio aereo non deve in alcun modo ridurre la sicurezza del sistema, abbassandone le performance attuali in termini di safety ed efficienza, ma può avere conseguenze inattese. Come vedremo in seguito infatti, durante la fase di raccolta dei requisiti ed ancor maggiormente nella fase di validazione dei risultati, è emerso che la totale trasparenza delle peculiarità e delle caratteristiche dei nuovi agenti UAS/RPAS, e dunque la loro equiparazione agli aeromobili tradizionali, potrebbe avere impatti non previsti e non desiderabili all'interno del sistema di Controllo del Traffico Aereo.

I requisiti che è necessario implementare nei nuovi sistemi UAS/RPAS affinché possano essere introdotti nel sistema socio-tecnico complesso del Traffico Aereo sono molto numerosi e complessi e prevedono la definizione di nuovi standard, procedure, ruoli, responsabilità. Molti enti regolamentari (Civil Aviation Authority - Safety Regulation Group, 2012), gruppi di lavoro internazionali (EUROCAE WG73), progetti di ricerca (MIDCAS Project), si stanno concentrando su alcuni

aspetti specifici, ad esempio gli standard di comunicazione tra la Stazione di Pilotaggio Remoto e l'aeromobile o i requisiti fisici e di *training* dell'equipaggio. L'obiettivo del progetto ICONUS è stato piuttosto l'identificazione e la raccolta di requisiti di alto livello che comprendessero il più ampio spettro possibile di aspetti e problematiche. Tale scelta è stata adottata principalmente perché una ricerca che punta a considerare tutti gli aspetti della problematica permette di avere una visione più ampia e di cogliere le possibili interazioni e sovrapposizioni tra diversi ambiti. Inoltre il quadro normativo ancora in definizione rende quasi impossibile la definizione di operazioni e standard, dunque di soluzioni dettagliate e stabili, che possano indirizzare con sufficiente certezza le scelte implementative dei produttori di UAS/RPAS.

Ovviamente la scelta di trattare uno spettro molto ampio di aspetti in un progetto di durata semestrale ha avuto un impatto sul livello di dettaglio con cui sono stati definiti i requisiti. Il livello di dettaglio da perseguire nella raccolta dei requisiti è stato una delle problematiche aperte durante tutto il progetto ed è stato oggetto, come mostrato nel paragrafo successivo, di un'attenta analisi e di successivi raffinamenti durante la fase di validazione.

I requisiti sono stati suddivisi seguendo alcune categorie principali, identificate dal consorzio dopo alcune brevi valutazioni iniziali: Standardizzazione, Aspetti Regolamentari e Legali, Sistemi e Tecnologie, Procedure, Fattori Umani. All'interno di queste macro-categorie sono stati raccolti i requisiti, utilizzando una rappresentazione comune. A titolo di esempio si riportano tre dei requisiti da me formulati all'interno della macro-categoria Fattori Umani e che riguardano la formazione ed il training dell'equipaggio remoto:

Enabler	Requirements
HUM-TRA-01 Remote pilot training [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-TRA-01-01:</b> Continuous training for licensed remote pilots must be similar to training for pilots in manned aviation. It must include both the aeronautical knowledge and operational components. Training must consider the particular and unique nature and characteristics of the remote pilot station environment and RPA applications from a technical and flight operations perspective, as well as aircraft type. [ENB-INS-ICAO-01]
HUM-TRA-02 RPA observer training [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-TRA-02-01:</b> Continuous training for licensed RPA observers must enable her/him to assist the remote pilot in the safe conduct of the flight by visual observation of the RPA in VLOS operations. The training should include aeronautical and operational knowledge and technical RPAS characteristics.
HUM-TRA-03 ATC personnel training [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-TRA-03-01:</b> Additional training requirements for air traffic controllers and other ATC personnel must include specific topics related to RPAS integration in non-segregated airspace: RPA performance, behaviour, communication, operational limitations, standard and emergency procedures, remote pilots handover [NEED-AHR-01]

Figura 19: Esempio di requisiti di alto livello riguardo la formazione dell'equipaggio remoto di UAS/RPAS

Nella colonna sinistra (“Enabler”<sup>14</sup>) è riportato il campo di applicazione del requisito in questione, associato ad un codice univoco per una più semplice indicizzazione. Le lettere [C/S/M/L] indicano l’intervallo temporale di riferimento in cui il requisito dovrà essere implementato (rispettivamente Current Situation, Short Term, Medium Term, Long Term). Il fatto che per i tre requisiti qui elencati siano presenti più lettere è motivato dal fatto che per ognuno di essi è prevista una evoluzione attraverso tutti gli intervalli temporali di riferimento.

Nella colonna destra sono definiti i requisiti veri e propri, identificati univocamente da un codice che raccoglie la macro-categoria (nello specifico HUM, Human), il campo di applicazione (TRA, Training) ed una numerazione progressiva che tiene in

<sup>14</sup> All’interno dell’European ATM Master Plan (<https://www.atmmasterplan.eu/>), che raccoglie tutte le innovazioni previste dal programma SESAR, gli Enablers sono così definiti: “An enabler is a change to the supporting infrastructure – systems, human, institutional or procedural.”.

considerazione la possibilità che ad un “Enabler” siano associati più requisiti. La definizione del requisito prevede una breve descrizione testuale ed eventuali riferimenti ad altri requisiti contenuti nel documento.

All’interno del progetto ICONUS sono stati definiti circa un centinaio di requisiti per l’introduzione degli UAS/RPAS negli spazi aerei civili. La lista completa è consultabile nella documentazione di progetto.

La partecipazione alla fase di raccolta dei requisiti è stata importante all’interno della mia ricerca, perché mi ha permesso di approfondire e contattare concretamente alcune delle tematiche e delle considerazioni incontrate durante la mia formazione teorica. Il mio contributo originale in questa fase del progetto è stato principalmente la raccolta e la definizione dei requisiti riguardanti i Fattori Umani ed il processo di negoziazione e pianificazione collaborativa delle operazioni tramite il network SWIM (cfr. paragrafo 1.1.1), oltre ad una accurata revisione dei requisiti afferenti alle altre categorie individuate nel progetto. Durante questa fase una particolare attenzione è stata data alla raccolta ed al raffinamento dei cosiddetti *requisiti non funzionali* (Saleh & Al-Zarouni, 2004), con riferimento soprattutto alla categoria dei requisiti correlati alla componente umana, che comprendono i requisiti di usabilità, di HMI, requisiti correlati a responsabilità legali, contesto culturale di riferimento (nell’Appendice C è riportata la lista dei requisiti più significativi da me definiti). Ho avuto l’opportunità di svolgere queste attività presso la sede di Onera a Tolosa, Francia, durante uno stage di durata di un mese, che mi ha offerto l’occasione di lavorare in un ambiente molto collaborativo all’interno di un team internazionale e multi-disciplinare.

Ovviamente la fase di raccolta e definizione dei requisiti non è stata completata in un singolo passaggio, ma sono state necessarie diverse iterazioni e successivi raffinamenti, che hanno generato diverse versioni, discusse e rivedute sia internamente al consorzio che con il contributo di stakeholder esterni. Nel seguente paragrafo vedremo come la fase di validazione dei risultati del progetto abbia contribuito a definire ed applicare questo processo iterativo e collaborativo.

### **3.1.3 Validazione dei risultati**

Si può affermare che l'obiettivo realizzato dal progetto ICONUS nella raccolta dei requisiti per l'introduzione degli UAS/RPAS negli spazi aerei non è stato quello di produrre una lista di soluzioni, quanto piuttosto di comprendere e delineare gli aspetti potenzialmente più problematici e quelli più interessanti che tale introduzione può prospettare nel prossimo futuro. L'idea fondamentale è quella che il lavoro prodotto in ICONUS è un punto di partenza, una solida piattaforma comune su cui basare discussioni e ricerche che coinvolgano la comunità scientifica e tutti gli stakeholder del dominio.

Il processo di validazione delle metodologie utilizzate e dei risultati prodotti dal progetto è stato indirizzato dalle considerazioni appena esposte, che ne hanno guidato il lavoro e le conclusioni.

La validazione ha affiancato sostanzialmente tutte le fasi del progetto ed ha previsto due principali attività:

- la verifica ed il raffinamento, condotti internamente al consorzio, dei risultati prodotti nelle fasi di definizione degli scenari e di raccolta dei requisiti;
- l'organizzazione di un workshop finale di validazione in cui sono stati raccolti opinioni, feedback, considerazioni e raccomandazioni di numerosi stakeholders appartenenti alla comunità UAS/RPAS, che hanno alimentato l'ultima iterazione del ciclo di definizione e formalizzazione dei requisiti prodotti dal progetto.

La verifica interna dei risultati si è svolta durante tutta la durata del progetto e si è sviluppata principalmente attraverso i seguenti strumenti: una attenta ed analitica revisione dei documenti di progetto da parte di tutti i partner del consorzio e discussioni in presenza durante i meeting di progetto mensili. Questo processo si è dimostrato efficace per evidenziare le connessioni e le sovrapposizioni tra differenti requisiti e per definire una visione comune del consorzio riguardo le tematiche trattate. Terminato il processo di raffinamento interno, i risultati di progetto sono stati discussi con esperti esterni al consorzio durante un workshop finale di validazione e consolidamento.

### ***3.1.3.1 Workshop finale di progetto e Focus Group***

L'organizzazione del workshop finale è stata l'attività che ha richiesto il mio maggior impegno all'interno del progetto. Ho avuto infatti l'opportunità di coordinare e realizzare in prima persona le varie fasi di pianificazione, esecuzione ed analisi dei risultati dell'incontro. Le principali scelte e decisioni, ad esempio la lista dei partecipanti, la metodologia utilizzata, gli obiettivi dei questionari somministrati, sono state di mia responsabilità, ovviamente in stretto coordinamento con il capo progetto, i partner ed in particolare i colleghi di Deep Blue. Nel seguito, dopo aver richiamato brevemente gli obiettivi del workshop, verranno descritte nel dettaglio le scelte effettuate ed i risultati ottenuti all'interno di questa attività.

#### *Obiettivi*

L'obiettivo principale del "Workshop di Validazione e Consolidamento" del progetto ICONUS è stato quello di presentare i risultati ad un'ampia platea di stakeholder del dominio UAS/RPAS, allo scopo di rivedere e consolidare il lavoro fatto e di produrre un insieme di raccomandazioni e proposte per studi futuri. Nello specifico, dunque, il Workshop ha contribuito per prima cosa alla validazione dei requisiti tecnici ed operativi identificati dal Consorzio durante il progetto ICONUS riguardo l'introduzione degli UAS/RPAS negli spazi aerei in un prossimo futuro, con particolare riferimento all'evoluzione del sistema ATM prefigurato all'interno del programma SESAR. Sono state discusse anche alcune tematiche analizzate durante il progetto che si sono rivelate particolarmente complesse o di difficile definizione, ad esempio per mancanza di regolamenti o di standard di riferimento, e dunque presentano problematiche ancora aperte, e nuove ne sono emerse durante il Workshop stesso.

#### *Partecipanti*

Le considerazioni appena esposte hanno indirizzato la scelta dei potenziali partecipanti da invitare all'evento. L'obiettivo principale è stato quello di comporre un'audience internazionale che potesse raccogliere conoscenze ed esperienze diverse e complementari: esperti di regolamentazioni, di aspetti legali e Autorità competenti;

figure fortemente legate al contesto operativo e dunque Controllori di Volo e piloti; rappresentanti della grande industria e della piccola media impresa; rappresentanti del mondo dell'università e della ricerca. Il numero massimo di partecipanti è stato limitato dalla logistica della location, ma soprattutto dalla considerazione che un ridotto numero di partecipanti avrebbe facilitato una maggiore interazione tra i presenti e con i partner del progetto. Il numero finale è stato di 35 partecipanti, provenienti da 6 diverse nazioni europee e distribuiti come segue tra le varie aree precedentemente indicate<sup>15</sup>:

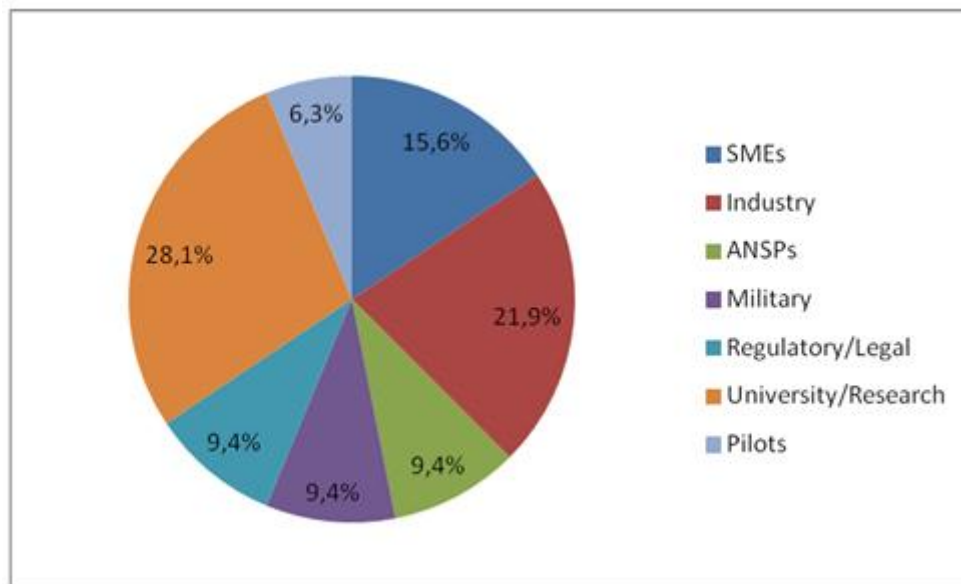


Figura 20: Area di provenienza dei partecipanti al workshop di ICONUS

Come mostrato nel grafico, i partecipanti al workshop sono stati ben distribuiti tra le varie componenti della comunità RPAS, garantendo così una copertura completa di tutte le aree e le tematiche di interesse trattate nel progetto.

Sebbene le tematiche trattate presentassero un'elevata complessità si è deciso di concentrare tutti i lavori in un'unica intera giornata, per agevolare la presenza di un maggior numero di invitati.

<sup>15</sup> SME: *Small & Medium enterprise*. ANSP=*Air Navigation Service Provider*, ovvero organizzazioni preposte al controllo del Traffico Aereo

### *Metodologia*

Al fine di favorire uno scambio interattivo ed il coinvolgimento dei partecipanti, considerati elementi chiave per il successo del workshop, sono stati definiti 3 differenti momenti successivi all'interno della giornata:

- I lavori si sono aperti con la presentazione, a cura del capo progetto e dei responsabili delle singole attività, degli obiettivi del progetto ICONUS alla platea dei partecipanti, con una breve descrizione delle metodologie e dei risultati prodotti nella fase di definizione degli scenari e di raccolta dei requisiti;
- Successivamente i partecipanti sono stati divisi in gruppi di lavoro in base alle loro rispettive competenze ed invitati a proseguire i lavori in sessioni parallele coordinate da alcuni dei membri del consorzio che hanno lavorato al progetto. Questa fase è stata il momento centrale del workshop ed ha avuto la durata più lunga;
- Al termine delle sessioni parallele un rappresentante designato per ogni gruppo ha riportato all'intera platea i risultati prodotti.

Il workshop si è concluso con la distribuzione di un questionario di valutazione riguardo le attività di progetto oggetto del workshop, che è stato compilato a cura dei partecipanti.

Nel seguito saranno dettagliate le diverse fasi, indicando per ognuna le motivazioni e le scelte che hanno condotto alla loro definizione, insieme ai risultati attesi per ognuna di esse.

La fase di presentazione frontale in sessione plenaria degli obiettivi e dei principali risultati del progetto è stata ideata come una introduzione fondamentale per inquadrare e comprendere il lavoro da svolgere nei successivi momenti del workshop. Si è scelto per questa sessione di limitare a 15 minuti l'intervento introduttivo del capo progetto ed a 30 minuti l'intervento di descrizione ad alto livello dei risultati prodotti nelle fasi di definizione degli scenari e di raccolta dei requisiti per l'integrazione degli UAS negli spazi aerei civili. Gli interventi sono

stati seguiti da un *question time* di circa 5 minuti. Queste tempistiche piuttosto ristrette sono motivate dall'intenzione di lasciare maggiore spazio alle successive sessioni interattive, lasciando ai coordinatori dei gruppi di lavoro, appartenenti al consorzio di progetto, la responsabilità di chiarire eventuali dubbi.

Le sessioni di lavoro interattive di gruppo sono state identificate come lo strumento più importante per il raggiungimento degli scopi del workshop e per questa ragione sono state progettate con particolare attenzione. L'obiettivo principale di questa parte del lavoro è stato quello di coinvolgere il più possibile i partecipanti al workshop in un processo di affinamento dei requisiti identificati nel progetto ICONUS e di stimolare una discussione che permettesse di aggiungere nuovi requisiti o di identificare nuove sfide non ancora discusse all'interno del progetto. La metodologia adottata in questa fase è stata quella del *focus group*, o gruppo di discussione, una tecnica qualitativa che permette di raccogliere feedback e considerazioni in modo interattivo ed informale (Krueger & Casey, 2000). La scelta della modalità è maturata sia sulla base dell'analisi delle evidenze della sua efficacia presenti in letteratura (Hayes & Tatham, 1989) (Stagi, 2000), che su considerazioni fondate su precedenti esperienze di partecipazione a tali gruppi, che si dimostrano una tecnica proficua per analizzare e discutere, tramite un approccio qualitativo, questioni complesse e specifiche in tempi ridotti.

La metodologia del focus group prevede 4 fasi principali (Kontio, Lethola, & Bragge, 2004), che riportiamo brevemente:

- Definizione del problema;
- Selezione dei partecipanti;
- Pianificazione e conduzione delle sessioni;
- Analisi dei risultati.

Avendo già discusso ampiamente la definizione del problema e motivato la selezione dei partecipanti, nel seguito ci concentreremo sulle attività di pianificazione e conduzione e sulla successiva analisi dei risultati raccolti.

Seguendo l'approccio teorico introdotto, durante la preparazione del workshop sono stati identificati, basandosi sul profilo dei partecipanti, 3 gruppi di discussione caratterizzati dall'ambito di provenienza e dunque dalle conoscenze dei rispettivi membri: Esperti Operativi (controllori di volo, piloti civili e militari), Ricerca (accademici, ricercatori, appartenenti a dipartimenti di Ricerca e Sviluppo) e Sistemi (rappresentanti dell'industria, sviluppatori). Distribuendo i 34 partecipanti su 3 gruppi si è ottenuta una numerosità ideale per la metodologia del *focus group*, stimata in letteratura tra gli 8 e i 12.

Ogni gruppo di lavoro è stato affidato ad un *facilitatore* ed un *segretario*, scelti durante la preparazione del meeting tra i membri del consorzio di progetto. Il ruolo del facilitatore è stato quello di indirizzare la conversazione sulle tematiche di interesse del workshop, pur incentivando e stimolando un libero flusso di idee tra i partecipanti, mentre il segretario si è occupato di registrare in forma scritta tutti i contenuti della discussione. Facilitatore e segretario sono stati supportati da materiale scritto, realizzato e distribuito prima del workshop (nomi ed affiliazioni dei membri del gruppo di discussione, linee guida, attività previste).

Durante le attività di focus i gruppi sono stati riuniti in 3 stanze differenti, in modo tale da minimizzare le fonti di distrazione e permettere ad ogni gruppo di esprimersi liberamente, organizzando anche il proprio spazio in maniera autonoma rispetto agli altri. La durata delle sessioni parallele è stata di circa 2 ore, intervallate da un break per il pranzo ed ognuna di esse è stata organizzata attraverso tre diversi passaggi.

Per prima cosa, dopo una breve auto-presentazione di tutti i membri del gruppo è stato condotto un esercizio di "riscaldamento", attraverso il quale i membri hanno familiarizzato tra di loro, e che ha introdotto la tematica. Durante questo esercizio è stato chiesto di ordinare rispetto alla loro importanza alcune affermazioni generiche riguardo l'introduzione degli RPAS negli spazi aerei. Le frasi, scritte su strisce di carta da disporre fisicamente nell'ordine concordato dal gruppo, sono state volutamente poco dettagliate e ambigue, in modo da favorire la discussione, così come non era prevista alcuna soluzione 'giusta' dell'esercizio.

In questa fase il facilitatore si è limitato a dare alcune brevi spiegazioni al gruppo, lasciando i partecipanti liberi di interpretare l'esercizio. E' stato interessante notare come, dopo un momento iniziale di stasi, ogni gruppo ha cominciato ad utilizzare lo spazio a disposizione per svolgere l'esercizio in modo differente, utilizzando strategie e modalità di comunicazione variegata (vedere Figura 21 e Figura 22).



Figura 21: Un gruppo di discussione svolge l'esercizio di riscaldamento disponendo le frasi da ordinare sul pavimento ed utilizzando una modalità di comunicazione "a tavola rotonda"



Figura 22: Un gruppo di discussione utilizza un tavolo per ordinare le frasi ed una distribuzione spaziale asimmetrica e non strutturata

Dopo la fase di familiarizzazione i facilitatori hanno dato inizio al processo di validazione e consolidamento dei requisiti prodotti dal progetto ICONUS. Nelle fasi di preparazione del workshop i partner del progetto ICONUS hanno selezionato una lista di requisiti di alto livello e di problematiche non ancora sufficientemente definite per essere espresse in forma di requisiti, ma che presumibilmente nei prossimi anni genereranno interesse nella ricerca. I requisiti selezionati sono stati formulati con un livello di astrazione più alto rispetto a quello utilizzato all'interno del progetto, in modo tale da riuscire a validare all'interno del workshop non le singole soluzioni tecniche proposte, ma piuttosto l'idea che ha portato alla definizione di tali requisiti e l'approccio alla problematica.

All'interno di ogni gruppo la lista di requisiti e di sfide per la ricerca, composta da circa 15 elementi, è stata presentata brevemente dal facilitatore e i membri del gruppo sono stati invitati a selezionarne 5, che sono stati poi oggetto di discussione. La scelta di invitare i partecipanti a selezionare solo alcuni elementi è stata motivata dalla volontà di lasciare ogni gruppo libero di esprimersi riguardo gli argomenti di

maggior gradimento e per i quali i membri del gruppo si sentissero in grado di fornire un contributo valido.

Per ognuno dei requisiti selezionati dal gruppo, il facilitatore ha coordinato una discussione interattiva, coinvolgendo tutti i partecipanti del focus group. Nello svolgere questo compito il facilitatore è stato supportato da una serie di domande precedentemente fornitegli, che non ha dovuto necessariamente porre, ma che sostanzialmente fornivano una traccia per indirizzare la discussione, ad esempio:

- Concordate con questo requisito? Se no, perché? (Es.: infattibilità tecnica, incompatibilità con regolamentazioni ICAO, etc.)
- Come questo requisito potrebbe avere effetti sul vostro lavoro quotidiano? Quali effetti potrebbe avere nelle operazioni di Controllo del Traffico Aereo?
- Questo requisito potrebbe impattare sulle tecnologie attuali che utilizzate/producite? In che modo?
- E' necessario creare nuovi concetti ATM – o nuovi sistemi/procedure/regolamenti – o modificare gli attuali affinché questo requisito possa essere soddisfatto?
- Il requisito è espresso in modo chiaro/esaustivo? Se no, perché? Siete in grado di produrre una nuova formulazione?



Figura 23: La facilitatrice ed il segretario (prima e secondo da destra) coordinano uno dei focus group

Dopo aver discusso i 5 requisiti selezionati è stato chiesto di integrarli con eventuali raccomandazioni e proposte per nuove attività e studi.

A questo punto ogni gruppo, con il supporto del facilitatore e del segretario, che nelle fasi precedenti ha riportato tutte le discussioni su dei moduli forniti dall'organizzazione, ha prodotto una breve presentazione PowerPoint, basata su un template comune fornito al segretario, che riassume l'attività svolta durante l'intera sessione e le opinioni emerse durante il focus group. L'elezione di un membro del gruppo (esclusi facilitatore e segretario) incaricato della presentazione ha concluso le sessioni parallele.

I partecipanti delle 3 sessioni parallele sono stati poi riuniti nella sala principale ed ognuno dei rappresentanti designati ha riportato, con il supporto della presentazione, le discussioni e le opinioni maturate all'interno del proprio gruppo, con un tempo a disposizione di circa 10 minuti a testa.



Figura 24: Il rappresentante del gruppo Esperti Operativi presenta i risultati

Una breve chiusura da parte del consorzio di progetto ed un question time finale hanno chiuso i lavori del workshop. Durante gli atti finali dell'incontro è stato distribuito a tutti i partecipanti un questionario composto da domande a risposta chiusa (basate su scala Likert a 7 valori) ed uno spazio di testo libero per raccogliere feedback e commenti.

	Strongly Disagree		Neither agree nor disagree			Strongly Agree		Not Applicable
	0	1	2	3	4	5	6	NA
1. ICONUS has exhaustively identified all the main requirements and associated SESAR capabilities for the introduction of RPAS in SESAR.	0	1	2	3	4	5	6	NA
2. The produced presentations and documents are clear, sound and exhaustive.	0	1	2	3	4	5	6	NA
3. The identified main ICONUS requirements about RPAS will be useful for future work in SESAR.	0	1	2	3	4	5	6	NA
4. The identified main ICONUS requirements about RPAS will be useful for future work in RPAS industry.	0	1	2	3	4	5	6	NA
5. If other studies about the introduction of RPAS will be carried out, which topics to be analysed, would you suggest?	_____ _____ _____ _____							

Figura 25: Questionario di valutazione per i partecipanti al workshop finale di validazione del progetto ICONUS

### Risultati del workshop

I risultati prodotti durante il workshop sono stati di tipo qualitativo (Focus Group) e quantitativo (compilazione dei questionari).

I risultati delle sessioni parallele sono stati raccolti per mezzo delle minute generate dai segretari e delle presentazioni prodotte dai singoli gruppi. Una prima interessante considerazione riguardo i risultati dei focus group riguarda la scelta dei requisiti da discutere internamente ad ognuna delle sessioni parallele. E' risultato infatti che ognuno dei gruppi ha selezionato e focalizzato la propria attenzione sugli stessi requisiti di alto livello per gli RPAS e nuovi concetti per l'ATM, nello specifico:

- Capacità di detect and avoid e di auto-separazione dal traffico (Requisito RPAS);

- Comportamento predefinito e sicuro in caso di emergenza/malfunzionamento (Requisito RPAS);
- Operazioni autonome in caso di perdita del canale di comunicazione con la Stazione di Pilotaggio Remoto (Requisito RPAS);
- Nuovi strumenti per i Controllori del Traffico Aereo che integrino alcune specificità degli RPAS (Nuovo concetto ATM);
- Integrazione nel concetto di traiettorie 4D di alcune specificità degli RPAS.

Il fatto che ci sia stata questa convergenza spontanea dei gruppi di lavoro su questi requisiti di alto livello ha in qualche modo confermato l'idea che queste tematiche sono le più sentite all'interno della comunità UAS/RPAS. E' interessante notare come uno degli assunti più importanti dell'ICAO viene qui in qualche modo messo in discussione: gli esperti provenienti da diversi ambiti concordano sul fatto che una totale trasparenza delle operazioni degli RPAS rispetto all'attuale sistema ATM potrebbe non essere la soluzione più auspicabile, prospettando l'opportunità di produrre, testare e mettere in esercizio strumenti per i controllori di volo che siano in grado di visualizzare caratteristiche uniche di questo tipo di aeromobile (radio range, traiettoria pre-programmata per eventuale atterraggio d'emergenza, modalità di volo VLOS o BVLOS, etc.). Un altro tema piuttosto caldo qui rappresentato è la discussione rispetto la possibilità di condurre alcune operazioni in modalità autonoma, opzione del tutto scartata dall'ICAO nelle sue proposte di regolamentazione. Anche qui gli esperti concordano che sia inevitabile introdurre un certo grado di autonomia decisionale dell'UAS/RPAS, ovviamente controllata ed opportunamente progettata, affinché le operazioni non causino una degradazione dei livelli di sicurezza anche nel caso di perdita del canale di comunicazione tra stazione di pilotaggio e segmento aereo.

Altre considerazioni interessanti dei partecipanti hanno riguardato la necessità di definire il training e le licenze delle nuove figure professionali che compongono l'equipaggio di un RPAS (pilota, eventuale osservatore, operatore della rampa nel caso di RPAS a decollo assistito, analista dei dati provenienti dai sensori del payload, etc.). E' emersa anche la necessità di chiarire e definire accuratamente le attribuzioni

di responsabilità per il pilota, i controllori, gli sviluppatori del sistema, le autorità di certificazione, specialmente nel caso operazioni svolte dal sistema automaticamente nel caso di perdita del canale di controllo dell'aeromobile. Questa tematica è attualmente oggetto di ricerca all'interno del progetto ALIAS (sito del progetto), che si occupa delle problematiche correlate all'attribuzione di responsabilità e liability in caso di incidenti in sistemi ad elevato livello di automazione, con un caso di studio incentrato proprio sugli UAS.

Tutte le considerazioni, i commenti, le proposte di modifica dei requisiti proposti durante il workshop sono state integrati nei giorni successivi nei documenti del progetto ICONUS, concludendo così la fase qualitativa di validazione dei risultati.

Dal punto di vista quantitativo i questionari di valutazione compilati dai partecipanti hanno contribuito a confermare la buona comprensione e la sostanziale condivisione della rilevanza delle tematiche discusse all'interno del workshop. Nel seguito, con riferimento al questionario illustrato in Figura 24 si riporta il valor medio e la distribuzione dei valori (da 0 a 6) ottenuti dalle domande a risposta chiusa.

**Domanda 1:** Feedback generale riguardo la completezza dei requisiti in relazione a SESAR. Valore medio ottenuto: **4,47**

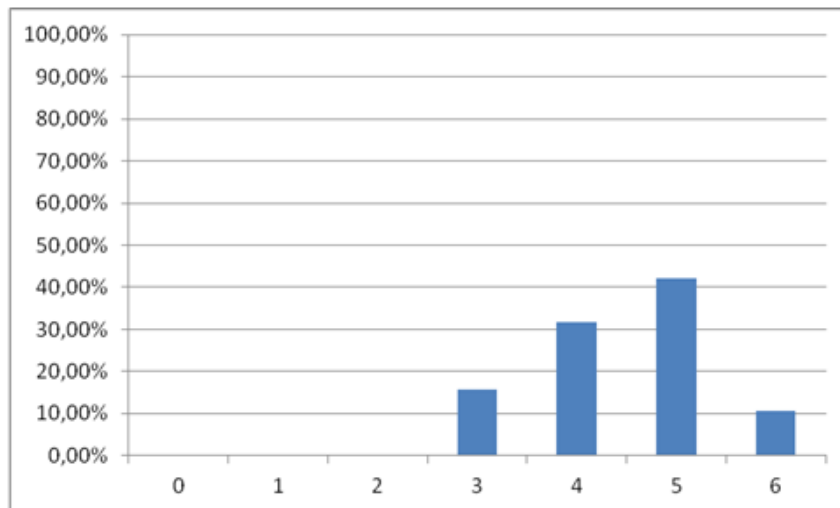


Figura 26: Distribuzione delle risposte date dai partecipanti alla Domanda 1 del questionario di valutazione

**Domanda 2:** Chiarezza e sensatezza nella presentazione dei risultati di ICONUS.  
Valore medio ottenuto: **4,68**

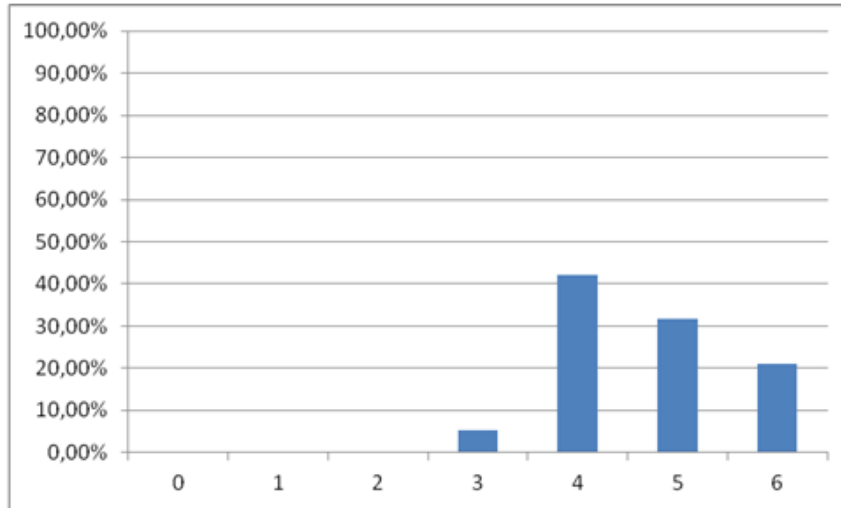


Figura 27: Distribuzione delle risposte date dai partecipanti alla Domanda 2 del questionario di valutazione

**Domanda 3:** Rilevanza dei risultati di ICONUS per SESAR. Valore medio ottenuto: **4,95**.

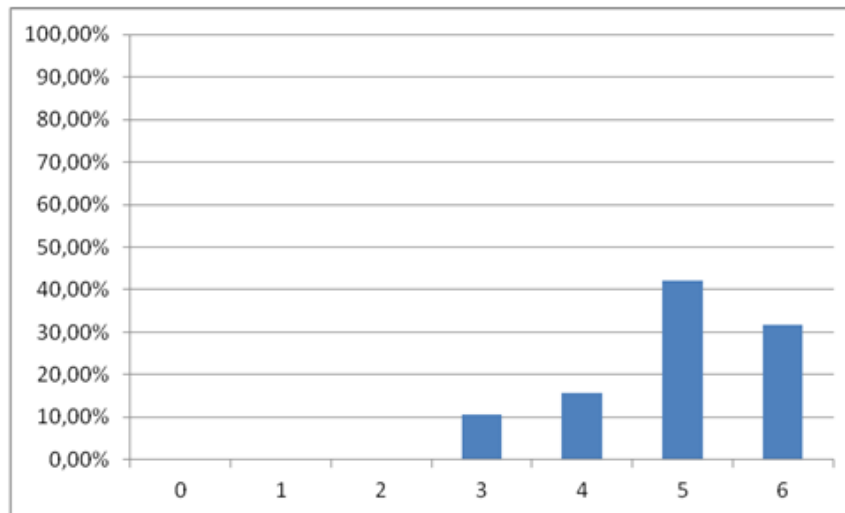


Figura 28: Distribuzione delle risposte date dai partecipanti alla Domanda 3 del questionario di valutazione

**Domanda 4:** Rilevanza dei risultati di ICONUS per l'industria RPAS. Valore medio ottenuto: **5,05**.

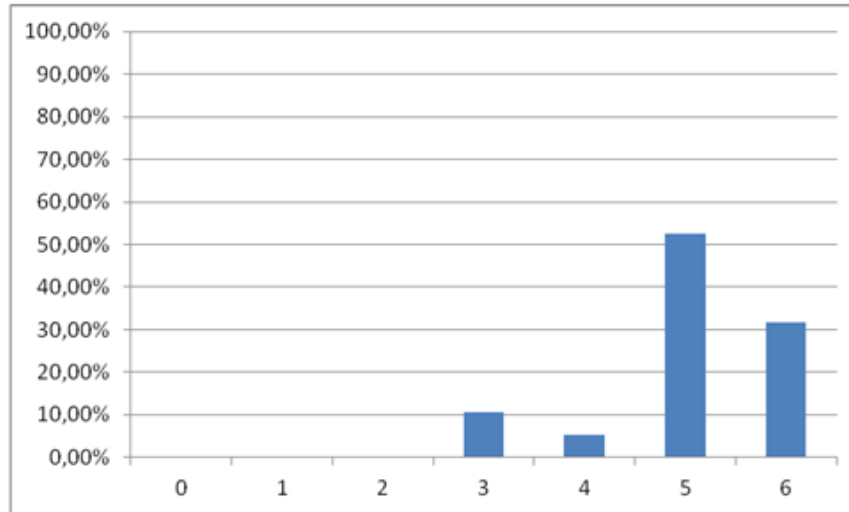


Figura 29: Distribuzione delle risposte date dai partecipanti alla Domanda 4 del questionario di valutazione

Le domande fanno specifico riferimento a SESAR, ma le conclusioni sono valide anche in un contesto più generale, con riferimento al sistema del Controllo del Traffico Aereo.

Le risposte a testo libero nei questionari hanno ricalcato piuttosto fedelmente le considerazioni e le opinioni raccolte durante i focus group.

In conclusione si può affermare che le metodologie utilizzate nel processo di validazione dei requisiti proposti dal progetto ICONUS si sono dimostrate un valido strumento, che ha permesso l'identificazione delle problematiche e delle potenzialità legate all'introduzione degli UAS/RPAS nel sistema del Traffico Aereo. L'approccio sistemico e multi-disciplinare con cui è stato impostato il lavoro di definizione degli scenari e di raccolta e validazione dei requisiti ha permesso di evidenziare come le mutue interazioni tra le componenti del sistema vengano inevitabilmente influenzate ed impattate dalla complessità di una tale integrazione. In particolare lo strumento del focus group si è dimostrato molto efficace, perché ha permesso di inquadrare e discutere alcune delle questioni più controverse, come ad esempio l'opportunità di

introdurre nuovi strumenti e procedure lato Controllo del Traffico Aereo che semplifichino l'integrazione degli Aeromobili a Pilotaggio Remoto.

I requisiti e le considerazioni prodotti e validati all'interno del progetto ICONUS hanno portato un contributo al processo di integrazione degli UAS/RPAS negli spazi aerei civili. Sebbene tali requisiti non possano ancora essere considerati esaustivi e completi, e dunque maturi per applicazioni dirette in termini industriali ed operativi, ritengo che essi contribuiscono a definire una robusta base per uno sviluppo nel prossimo futuro. I metodi di validazione illustrati in questa ricerca, ed in particolare il focus group con esperti, potranno fornire un valido supporto all'evoluzione dei requisiti. Gli strumenti di validazione, accompagnando lo sviluppo attraverso i successivi livelli di maturità, possono attestarne il reale e corretto raggiungimento, così l'organizzazione periodica di focus group con esperti potrà contribuire alla verifica e alla definizione di un piano progressivo di introduzione degli UAS/RPAS nel Sistema del Traffico Aereo.

## **Conclusioni**

L'obiettivo del mio Dottorato presso la Scuola di Telematica e Società dell'Informazione dell'Ateneo di Firenze è stato studiare come un approccio multi-disciplinare, fondato su di un solido background teorico, sia in grado di supportare il processo di design e di rinnovamento di componenti tecnologiche all'interno di sistemi socio-tecnici complessi, con particolare riferimento all'introduzione degli Unmanned Aircraft System (UAS) negli spazi aerei civili.

La sfida che ha animato e mosso questa ricerca è stata quella di identificare ed applicare strumenti e metodologie per supportare il processo di design di nuove tecnologie correlate agli UAS, in tale modo da garantire una progressiva integrazione di questi nuovi sistemi negli spazi aerei civili, preservandone e possibilmente aumentandone il potenziale tecnologico innovativo.

Nel capitolo primo è stato introdotto e descritto il dominio di applicazione della mia ricerca, ovvero il sistema del traffico aereo, con particolare riferimento al processo di innovazione continua che ne caratterizza lo sviluppo. All'interno della moltitudine di nuovi sistemi, tecnologie, procedure destinati a rivoluzionare il dominio del traffico aereo nel prossimo futuro, un ruolo importante è ricoperto dall'introduzione degli UAS negli spazi aerei civili. Questi aeromobili, ed in particolare gli appartenenti alla categoria degli RPAS (Remotely Piloted Aircraft System), sono utilizzati ormai da decenni per scopi militari ed il loro coinvolgimento in scenari bellici è in costante crescita, al punto che diversi analisti della Air Force statunitense prevedono a breve il sorpasso delle operazioni condotte in remoto rispetto alle missioni con aeromobili tradizionali. Al contrario

il mercato degli RPAS per scopi civili è ancora immaturo rispetto al contesto militare, nonostante le applicazioni siano molto promettenti in termini di ricadute economiche e sociali. Affinché si possa verificare un pieno sviluppo del potenziale offerto dalla tecnologia UAS per scopi civili è necessario che l'attuale situazione, in cui tali sistemi possono operare solo in determinate aree segregate, ovvero in cui nessun altro aeromobile può volare, previa autorizzazione degli enti preposti al controllo degli spazi aerei, evolva progressivamente verso una completa integrazione con il normale traffico aereo.

La natura stessa del sistema del Controllo del Traffico Aereo, ovvero quella di un sistema **socio-tecnico complesso**, offre sfide ed opportunità importanti correlate all'introduzione degli UAS. Tali sfide possono essere affrontate partendo da un solido approccio teorico multi-disciplinare, fondato sulla teoria dei sistemi complessi (Rind, 1999) e su modelli teorici dei sistemi socio-tecnici (Edwards, Human Factors in Aviation, 1988) (Hawkins, 1993), che contribuiscono a definire il quadro teorico di riferimento di questa tesi.

Una delle sfide principali legate alla introduzione degli RPAS all'interno del sistema del traffico aereo è la definizione di tecnologie, procedure ed operazioni che garantiscano la separazione, ovvero il mantenimento di una distanza sicura, dagli ostacoli e dal restante traffico (composto da altri RPAS e/o da aeromobili tradizionali). Sebbene il mantenimento delle distanze di separazione sia uno dei compiti principali del Controllo del Traffico Aereo, vi sono condizioni in cui il pilota deve essere in grado di garantire in autonomia tale separazione (ad esempio nel caso di volo operato secondo le Regole del Volo a Vista, oppure in spazi aerei non coperti dal servizio di Controllo del Traffico Aereo, o ancora in condizioni di emergenza). Questo requisito assume una rilevanza ancora maggiore per gli RPAS poiché vi potrebbero essere situazioni contingenti, come ad esempio la perdita temporanea o definitiva del canale di comunicazione tra stazione di pilotaggio a terra e segmento aereo, in cui la capacità di garantire automaticamente una separazione sicura dagli ostacoli orografici e dal traffico è di vitale importanza. Inoltre nel caso degli RPAS la situation awareness del pilota è

stravolta, rispetto agli aeromobili tradizionali, dalla sua posizione remota che gli impedisce, tra le altre cose, di basarsi sulla rilevazione a vista degli ostacoli.

Nel capitolo secondo di questa ricerca è stato illustrato come il progetto europeo ARCA ha affrontato la problematica della separazione, sia in un contesto collaborativo composto da soli agenti UAS, sia in un ambiente misto UAS-aeromobili tradizionali. Il mio contributo al progetto è stato il design e lo sviluppo di un innovativo algoritmo per la auto-separazione basato sulla Teoria dei Giochi e sul modello teorico dei Sistemi a Molti Agenti. L'algoritmo è stato da me implementato in un ambiente real-time, ovvero su hardware avionico dedicato montato su di un sistema UAS. Per validare i risultati ottenuti dall'algoritmo è stato realizzato, in collaborazione con i colleghi dell'ENEA, un piano di validazione basato su simulazioni con diversi livelli di complessità e di realismo. Le campagne di simulazione hanno prodotto importanti risultati, che sono stati confrontati con gli esperimenti riportati in letteratura, confermando la validità e le interessanti prospettive dell'approccio utilizzato. Il lavoro svolto all'interno del progetto ARCA ha fornito elementi importanti al mio percorso di Dottorato di Ricerca. Esso mi ha permesso di approfondire le problematiche e le sfide che si pongono ai progettisti ed agli sviluppatori di applicazioni in ambito UAS. Infatti, sebbene lo sviluppo del prototipo per scopi di ricerca non prevedesse il raggiungimento di un livello di maturità industriale, molte delle considerazioni correlate al contesto operativo di riferimento, sia lato UAS che lato Controllo del Traffico Aereo, sono state integrate, sebbene con alcune semplificazioni. D'altro canto i risultati ottenuti durante il progetto hanno contribuito a confermare e rafforzare le idee riguardanti il potenziale di questa nuova tecnologia: le soluzioni innovative prodotte, oltre a contribuire alla riduzione dei vincoli alle applicazioni civili degli UAS, favorendone l'integrazione negli spazi aerei, possono fornire interessanti contributi alla ricerca sui metodi auto-separazione per aeromobili tradizionali.

Dopo aver approfondito ed analizzato alcune delle problematiche tecnologiche correlate all'introduzione degli UAS per scopi civili, la mia ricerca si è ampliata

coinvolgendo gli aspetti organizzativi, procedurali e regolamentari del sistema del traffico aereo che potrebbero essere influenzati da questo concetto innovativo. Questo è stato possibile grazie alla partecipazione al progetto ICONUS, introdotto e descritto nel capitolo terzo. Gli obiettivi principali del progetto sono stati la raccolta, la definizione e la validazione dei principali requisiti che gli UAS/RPAS devono soddisfare affinché possano essere introdotti in maniera sicura ed efficiente all'interno dell'attuale sistema del Traffico Aereo. Tali requisiti sono stati raccolti e definiti con un approccio sistemico e multi-disciplinare, che ha puntato ad identificare ed esplicitare le principali interazioni che coinvolgono le principali aree coperte dal progetto: Standardizzazione, Aspetti Regolamentari e Legali, Sistemi e Tecnologie, Procedure, Fattori Umani. All'interno delle attività di progetto mi sono occupato di raccogliere e definire i requisiti di Fattori Umani che dovranno essere implementati nei sistemi UAS/RPAS affinché la loro introduzione nel traffico aereo possa avvenire in modo sicuro ed efficiente nei prossimi anni. La mia attività principale all'interno del progetto si è però concentrata nella definizione, esecuzione e monitoraggio di un piano di validazione dei requisiti espressi nel progetto. Tale piano ha previsto una fase di review interna dei documenti prodotti dal Consorzio di progetto, ma soprattutto l'organizzazione di un workshop finale in cui i risultati della fase di raccolta e definizione dei requisiti sono stati discussi, analizzati e raffinati con il contributo di stakeholder ed esperti di dominio europei. Durante il workshop sono state utilizzati questionari e tecniche qualitative, come la metodologia del *focus group* (Kontio, Lethola, & Bragge, 2004) (Krueger & Casey, 2000) (Hayes & Tatham, 1989) per raccogliere opinioni, commenti, suggerimenti di modifica od aggiunta da parte degli esperti. I risultati dei questionari e le considerazioni raccolte grazie agli esperti sono state integrate nei documenti di progetto, consolidando ed arricchendo il lavoro svolto dal Consorzio. Il contributo fornito da questo lavoro alla mia ricerca è stato fondamentale perché la partecipazione alla fase di definizione dei requisiti, ma soprattutto la possibilità di coordinare il piano di validazione, mi hanno permesso di affrontare le sfide di ricerca oggetto del mio

Dottorato con una visione sistemica ed un approccio multi-disciplinare. L'utilizzo di strumenti consolidati come il focus group a supporto del processo di definizione dei requisiti si è dimostrata una tecnica efficace di validazione operativa e tecnica del lavoro svolto.

Tornando alla domanda di ricerca che ha animato il mio Dottorato si può affermare che l'introduzione degli UAS/RPAS negli spazi aerei civili potrà evolvere in modo sicuro ed efficace soltanto se il processo di innovazione tecnologica sarà affiancato, già dalle fasi di definizione e design, da un adeguato piano di validazione operativa che ne valuti, consolidi ed indirizzi attività e risultati. Questa necessità emerge dalle considerazioni raccolte durante la mia ricerca riguardo la numerosità e la complessità delle interazioni che si generano all'interno di un sistema socio-tecnico complesso come quello del traffico aereo, e che è necessario cogliere e tenere in considerazione durante tutte le fasi di sviluppo di concetti e tecnologie innovative.

L'utilizzo di focus group con esperti si è dimostrato una risorsa efficace nella validazione e consolidamento della fase di raccolta dei requisiti propedeutici all'introduzione negli spazi aerei degli UAS per scopi civili, e si candida ad essere uno strumento valido per supportare le fasi future di questo processo progressivo di integrazione. La definizione di un piano di validazione che supporti l'introduzione degli UAS civili attraverso le varie fasi di maturità di questo innovativo concetto è uno degli sviluppi futuri prevedibili per questo lavoro. Come già anticipato nel capitolo primo di questa tesi, una tale proposta si integra completamente nel futuro della ricerca definita all'interno dei programmi SESAR per l'Europa e Nextgen negli USA. All'interno di essi si sta definendo una roadmap per la progressiva integrazione degli UAS all'interno degli spazi aerei civili, che difficilmente potrà prescindere dalle considerazioni e dalle problematiche analizzate in questo lavoro.

## **Appendice A**

In questa sezione viene descritto nel dettaglio l'algoritmo ARCA, nella sua versione a 2 ed a 3 dimensioni.

### **Soluzione 2D**

Per descrivere il comportamento dell'algoritmo SGT partiamo dalla sua versione in 2 dimensioni.

Ad ogni esecuzione ogni aereo scambia informazioni ADS-B con gli aerei che lo circondano. Queste informazioni comprendono: posizione, destinazione, heading attuale, tempo di volo, ritardo (rispetto ad un volo lineare). Ad ogni secondo ogni aereo sceglie una tra cinque opzioni di direzione, scelte in base alle performance dell'aereo.

Ogni aereo ordina l'insieme dei suoi vicini visibili in base alla loro destinazione (se essa è vicina otterranno un valore più alto di ranking), ritardo e tempo di volo (più sono elevati, maggiore sarà il ranking). Per ogni aereo  $X_i$  definiamo un priority set  $P_i$ , ovvero l'insieme degli aerei per esso visibili con un ranking maggiore del suo. Essi sono anche detti genitori di  $X_i$ .

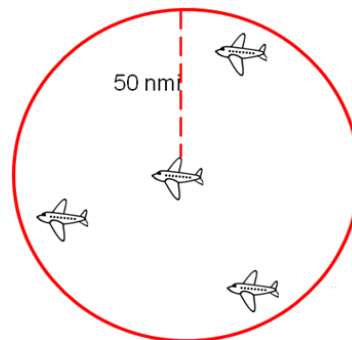


Figura 30: Insieme dei vicini

La funzione rejectability si basa esclusivamente sulla safety di  $X_i$ . Ogni aereo confronta l'estensione lineare delle sue opzioni direzionali con la proiezione dell'heading corrente nel proprio priority set. Ogni potenziale conflitto aggiunge peso all'opzione considerata, in base alla distanza nel tempo e alla severità del conflitto. Dopo aver considerato tutti i genitori il peso riferito ad ogni opzione viene normalizzato. Più in dettaglio: indichiamo con  $r_c$  il raggio di collisione e con  $r_{nm}$  il raggio di near miss, mentre  $u_c$  rappresenta l'heading corrente. Indichiamo con  $d(i,k)$  la distanza tra la posizione attuale di  $X_i$  e il punto di closest approach con  $X_k$  e con  $d_{min}(i,k)$  la distanza minore tra  $X_i$  e  $X_k$  sui loro percorsi riproiettati (lungo le diverse direzioni possibili).

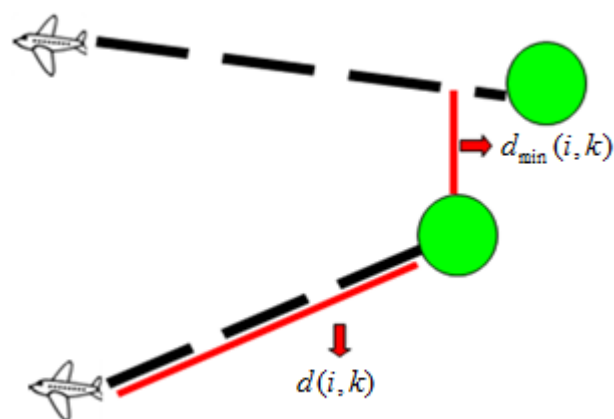


Figura 31: Closest point of approach

Allora siamo in grado di calcolare:

$$(A1) \quad p_{R_i}(u_l) = \sum_{X_k \in P_i} W_R(X_k(u_c), X_i(u_l))$$

Dove il peso WR è assegnato come segue:

$$W_R(X_k(u_c), X_i(u_l)) = \begin{cases} 2\alpha \leftarrow d_{\min}(i, k) \leq r_c \\ \alpha \leftarrow r_c < d_{\min}(i, k) \leq r_{nm} \\ 0 \leftarrow otherwise \end{cases}$$

E il parametro  $\alpha$  è dato da:

$$\alpha = \begin{cases} \left(1 + \frac{r_{nm} - d_{\min}(i, k)}{r_{nm}}\right) \left(\frac{1}{d(i, k)}\right)^\beta \leftarrow d(i, k) < 3r_{nm} \\ \left(\frac{1}{d(i, k)}\right)^\beta \leftarrow d(i, k) \geq 3r_{nm} \end{cases}$$

Tale costruzione aumenta la rejectability delle opzioni che portano a conflitti o sotto-separazioni, con un peso maggiore per gli incidenti più vicini nel tempo.

La funzione di selectability riflette il raggiungimento dell'obiettivo. Al contrario della rejectability, la selectability è influenzata dalle preferenze degli altri agenti.

Quindi abbiamo due componenti distinte per la selectability:

- la 'base selectability' che tiene in considerazione la preferenza (in termini di heading) dell'aereo in questione;
- la 'parent selectability' che tiene conto delle preferenze degli altri aerei visibili.

Quindi la funzione selectability è formata dalla combinazione convessa:

$$p_{S_i}(u_l) = \lambda \sigma_{S_i} + (1 - \lambda) \rho_{S_i}$$

con  $\lambda = 1$  se  $|P_i| = 0$ , altrimenti  $\lambda = 0.001$ .

Si calcola ora la 'base selectability'  $\sigma_{S_i}$ . Per prima cosa si assegna un rango  $r(u_l) = 1, \dots, 5$  ad ognuno opzione direzionale basandosi sulla distanza tra la direzione diretta verso la destinazione e l'heading considerato. Un peso  $w_s(u_l)$  viene poi assegnato come funzione del rango e della distanza:

$$w_s(u_l) = \begin{cases} 3 \Leftarrow r(u_l) = 1 \\ 2 \Leftarrow r(u_l) = 2 \\ 2 \Leftarrow r(u_l) = 3 \vee 2.5^\circ < |u_{dir} - u_l| < 5^\circ \\ 1.1 \Leftarrow r(u_l) = 3 \vee 5^\circ < |u_{dir} - u_l| \\ 1.1 \Leftarrow r(u_l) = 4 \vee |u_{dir} - u_l| < 5^\circ \\ 1 \Leftarrow r(u_l) = 4 \vee 5^\circ < |u_{dir} - u_l| \\ 1.1 \Leftarrow r(u_l) = 5 \vee |u_{dir} - u_l| < 5^\circ \\ 1 \Leftarrow r(u_l) = 5 \vee 5^\circ < |u_{dir} - u_l| \end{cases}$$

I pesi sono poi normalizzati per formare la ‘base selectability’.

Per il calcolo della ‘parent selectability’ si partiziona il priority set in  $|U| = 5$  sottoinsiemi  $S_1^g, \dots, S_5^g$ , basandosi sulla preferenza in termini di heading di ogni aereo (determinata dalla base selectability). Indichiamo con  $W_g(k)$  la cardinalità del sottoinsieme  $S_k^g$ . Per ogni sottoinsieme si calcola una matrice dei pesi (si avranno dunque 5 matrici):

$$W_{ik}(u_l^i, u_m^k) = \sum_{X_j \in S_k^g} W_S(X_i(u_l^i), X_j(u_m^k))$$

dove  $l = 1, \dots, 5$  e  $m = 1, \dots, 5$ . Definiamo  $W_S$  come:

$$W_S = \begin{cases} 1 \Leftarrow d_{\min}(i, k) > r_{nm} \\ 0 \Leftarrow d_{\min}(i, k) \leq r_{nm} \end{cases}$$

Quindi, ad ogni coppia di opzioni direzionali che non portano ad un conflitto viene assegnato un peso pari ad uno. Le colonne della matrice sono poi normalizzate in modo che:

$$\sum_{u^i \in U} W_{ik}(u^i, u_m^k) = 1$$

La selectability condizionale semplificata è calcolata come:

$$\rho_{S_i | S_1^g, \dots, S_5^g}(u_l^i | u^1, \dots, u^5) \propto \sum_{k=1, \dots, 5} W_g(k) W_{ik}(u_l^i, u^k)$$

Conseguentemente la selectability marginale è calcolata come:

$$\rho_{S_i}(u_l) = \sum_{u^1 \in U} \sum_{u^2 \in U} \dots \sum_{u^5 \in U} \rho_{S_i | S_1^g, \dots, S_5^g}(u_l^i | u^1, \dots, u^5) \sigma_{S_1^g}(u^1) \dots \sigma_{S_5^g}(u^5)$$

Nel nostro caso ogni partizione è trattata come un singolo aereo che influenza l'aereo considerato: si tratta di una semplificazione del modello originario, che permette di calcolare la parent selectability in modo più efficiente.

Finalmente siamo in grado di calcolare la selectability come combinazione convessa delle due componenti (come detto in precedenza).

Dopo aver calcolato rejectability e selectability, ogni agente (aereo) seleziona un'opzione direzionale. Tale opzione è quella che massimizza la differenza tra le funzioni di utilità selectability e rejectability:

$$u_l^i = \arg \max_{u_l^i \in U} (p_{S_i}(u_l^i) - p_{R_i}(u_l^i))$$

Dunque, ogni agente 'satisficing' ricerca il guadagno più alto, con il rischio più basso, prendendo in considerazione anche le preferenze degli altri agenti, e quindi ottenendo una soluzione efficace per l'intero sistema.

### Caso 3D

In questa sezione descriviamo la generalizzazione al caso 3D dell'algoritmo SGT. Nel caso in cui, dopo i calcoli effettuati per il caso 2D precedentemente descritti, le condizioni di traffico sono particolarmente impegnative (ovvero non esiste una direzione per cui la rejectability è sotto un certo valore di soglia), gli aerei possono salire o scendere ad un altro livello di volo. Il cambio di livello può portare ad una perdita di separazione nel nuovo livello, dunque viene attuato solo se è considerato una manovra sicura (applicando preventivamente lo stesso ragionamento sul nuovo livello). L'aereo in questione calcola le posizioni future di tutti i vicini (all'interno di una sfera), basandosi su: tempo necessario alla propria manovra; posizione attuale, velocità e heading degli altri agenti. Se non vi è alcun rischio di collisioni con altri aerei il cambio di livello è considerato sicuro (Figura 32). Il cambio di livello è deciso in modo molto conservativo perché l'algoritmo esplora tutte le possibili conseguenti configurazioni prima di metterlo in atto. Questa scelta è dettata dal fatto che un cambio di livello è più dispendioso in termini di consumo di carburante. In ogni caso è possibile cambiare la priorità

con cui viene scelta l'opzione verticale rispetto a quella orizzontale tramite il raffinamento di un parametro dell'algoritmo.

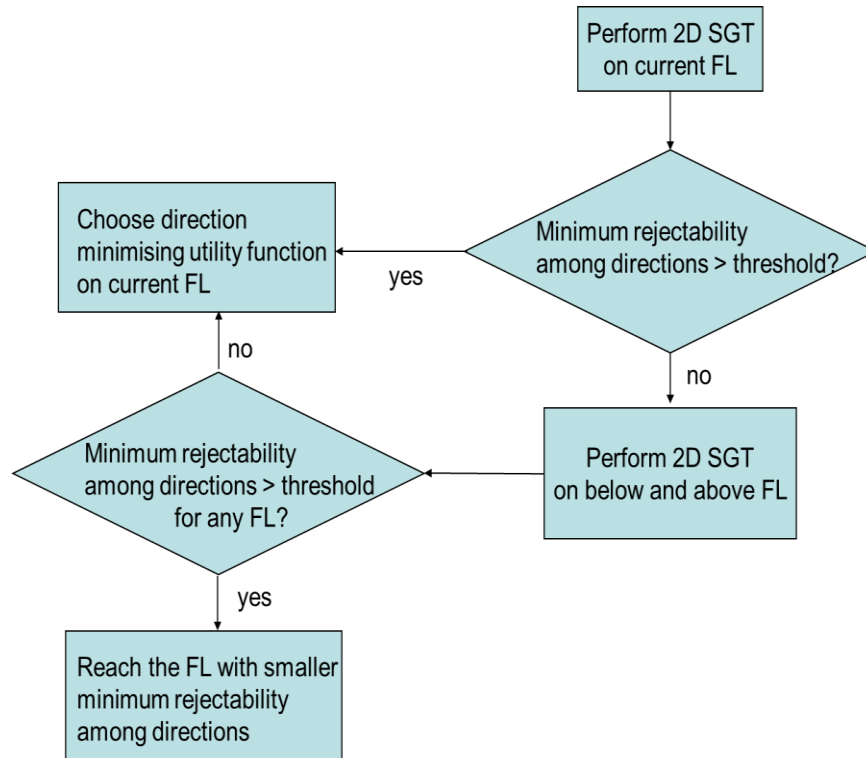


Figura 32: Decisional flow per l'agoritmo ARCA in 3D

In Figura 33 viene mostrato un esempio di cambio livello. In a) gli aerei calcolano SGT sulle 2 dimensioni per il loro livello di volo. Essendo la funzione di utilità rejectability sotto una certa soglia per ogni opzione direzionale (nessuna scelta è abbastanza sicura), in b) gli aerei valutano l'opzione di cambio livello. Il cambio rappresentato in b) non è sicuro perché può portare ad una violazione della separazione (in rosso è indicata l'area di separazione). In c) l'aereo più in alto decide di andare dritto (ovvero la migliore opzione calcolata nel caso 2D) poiché anche salire di un livello risulta pericoloso. L'aereo più in basso invece decide di scendere ad un livello più sicuro.

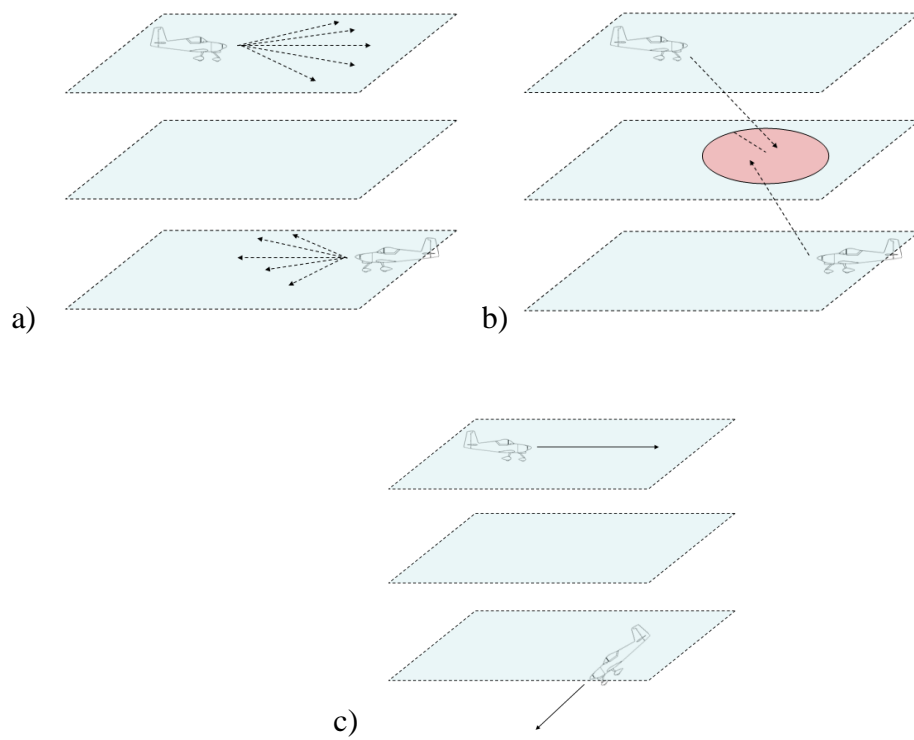
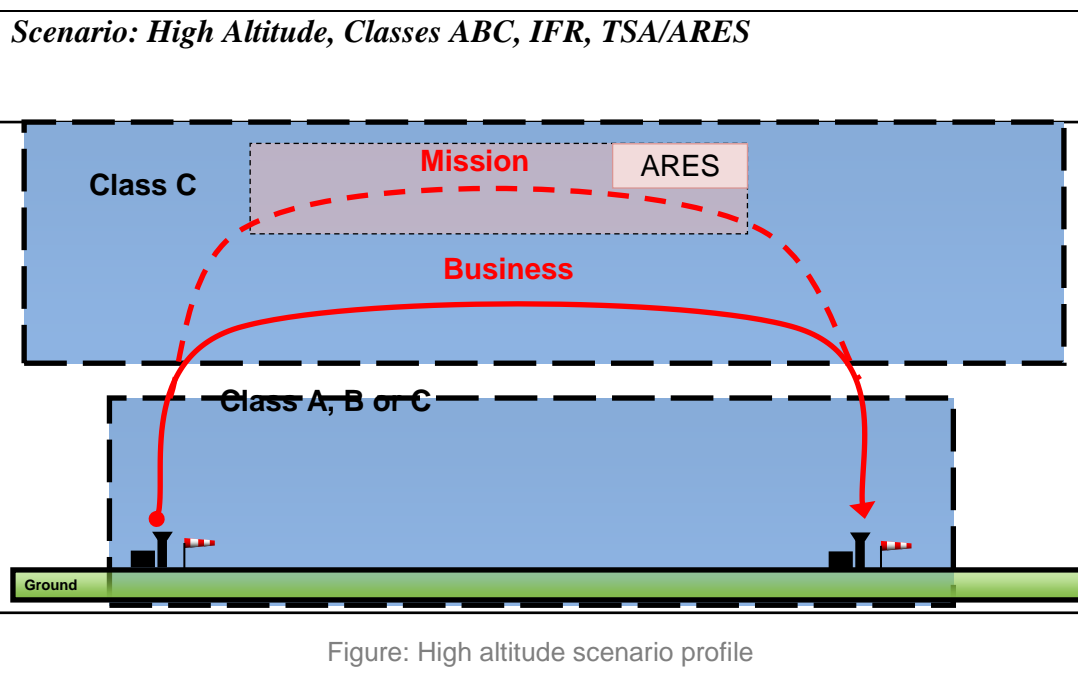


Figura 33: Un esempio di cambio di livello per l'algoritmo ARCA

## Appendice B

In questa sezione è riportato, a titolo di esempio, uno degli scenari identificati all'interno del progetto ICONUS.



Type of Flight	: IFR
Working Altitude	: High altitude: [FL 190 – FL 330].
RPA category	: Turboprop (cat 2)
RPA MTOW	: ~ 1000 Kg
Endurance	: 24 h
Cruise speed	: 350 Km/h
Departure terrain	: civil airfield
Arrival terrain	: civil airfield

Communication capacity : BLOS

Mission description : takes off from a civil airfield, navigates through airspace C where other coexisting manned traffic exist, enters a TSA/ARES to perform ISTAR activities (due to their inherent uncertainty) or join a training operation with other military aircrafts and returns back home.

This could also be the case for a military RPA transporting humanitarian aid beyond Europe. Applicability of this scenario to other applications and RPA categories is included in the application table.

This scenario intends to cover state aircraft (military or public) in which airspace reservation areas (ARES/TSA) will be used for the RPAs to perform their missions at high altitudes (19000-33000 ft) within ICAO airspace classes A, B; C (managed airspace in the long term within the SESAR framework), IFR rules and flight with other coexisting air traffic is considered.

This scenario includes RPAs able to fly over 19000 ft. Therefore VTOL and/or LTA RPAs are not considered (Cat 4 and 5 RPAs do not usually fly at these altitudes).

Everything considered under the general case is here applicable. However, several specificities can be considered. For missions dealing with Station keeping applications (communications relay) a foreseen circular trajectory maybe in place so that a RM/BT can be issued and no need to ARES/TSA is expected (also applicable to other scenarios).

## Appendice C

In questa sezione sono riportati i principali requisiti da me identificati e formulati all'interno del progetto ICONUS.

### Human enablers

Enabler	Requirements
HUM-TRA-01 Remote pilot training [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-TRA-01-01:</b> Continuous training for licensed remote pilots must be similar to training for pilots in manned aviation. It must include both the aeronautical knowledge and operational components. Training must consider the particular and unique nature and characteristics of the remote pilot station environment and RPA applications from a technical and flight operations perspective, as well as aircraft type. [ENB-INS-ICAO-01]
HUM-TRA-02 RPA observer training [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-TRA-02-01:</b> Continuous training for licensed RPA observers must enable her/him to assist the remote pilot in the safe conduct of the flight by visual observation of the RPA in VLOS operations. The training should include aeronautical and operational knowledge and technical RPAS characteristics.
HUM-TRA-03 ATC personnel training [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-TRA-03-01:</b> Additional training requirements for air traffic controllers and other ATC personnel must include specific topics related to RPAS integration in non-segregated airspace:: RPA performance, behaviour, communication, operational limitations, standard and emergency procedures, remote pilots handover [NEED-AHR-01]
HUM-ERG-01 Remote crew physical environment [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-ERG-01-01:</b> Ground station physical environment in which the remote crew works must be designed following physical and cognitive ergonomic principles. Support equipment, furniture, noise, lighting and temperature in the environment, and console design must ensure comfort and well being of the remote crew. Special attention must be dedicated to the RPA observer that is supposed to work outdoor in a potentially adverse environment.

Enabler	Requirements
HUM-ERG-02 Remote crew workload [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-ERG-02-01:</b> The task demand (amount of effort required to perform a task) and task complexity shall stay within acceptable limits. Task demand and complexity must be not under a certain threshold to avoid undesired effects like lack of attention or complacency and not too high to avoid cognitive or physical overload. Workload acceptability should be assessed with specific tools like NASA TLX and Instantaneous Self-Assessment (ISA).
HUM-ERG-03 ATM workload [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-ERG-03-01:</b> Workload for air traffic controllers should not be increased by the introduction of RPAS or at least shall stay within acceptable limits. Air traffic controllers workload must be not under a certain threshold to avoid undesired effects like lack of attention or complacency and not too high to avoid cognitive or physical overload. Workload acceptability should be assessed with specific tools like NASA TLX and Instantaneous Self-Assessment (ISA).
HUM-ERG-04 HMI for remote crew C/S/M/L	<b>REQ-HUM-ERG-04-01:</b> HMI for remote crew and especially remote pilot shall be designed according to human factors principles and usability and acceptability requirements.
HUM-ERG-05 Remote pilot situational awareness [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-ERG-05-01:</b> Systems (especially HMI) shall be designed to enhance pilot's situational awareness. Situational awareness for the remote pilot should be as much as possible the same as in a manned aircraft (or at least shall be comparable).
HUM-ERG-06 ATM situational awareness [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-ERG-06-01:</b> Systems (especially HMI) shall be designed to enhance controller situational awareness about RPAS. The HMI should indicate which aircraft are RPAs and eventually provide additional information (radio link range, recovery trajectory in case of loss of communication, emergency status)
HUM-INT-01 Interaction among remote crew members [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-INT-01-01:</b> Team dynamics and interaction among members of the crew shall be effective.  These aspects shall be covered by training. [HUM-TRA-01, 02]
HUM-INT-02 Interaction between remote pilots involved in handover M? [L?]	<b>REQ-HUM-INT-02-01:</b> If the RPA is piloted by different ground stations (e.g. for BRLOS missions) the handover shall be managed with particular attention to an effective interaction between the involved pilots.  This aspect shall be covered by training. [HUM-TRA-01]

Enabler	Requirements
HUM-INT-03 Interaction between controller(s) and remote pilot	<b>REQ-HUM-INT-03-01:</b> Interaction between remote pilot(s) and controller(s) shall be similar to the one between manned aircraft pilot(s) and controller(s). The only differences are related to C2 link latency and pilots handover.
HUM-INT-04 Interaction between controller(s) and remote pilot in the case of C2 link latency [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-INT-04-01:</b> Interaction between remote pilot(s) and controller(s) shall take into account RPAS latency on the C2 link These aspects shall be covered by training. [HUM-TRA-01, 02]
HUM-INT-05 Interaction between controller(s) and remote pilots in the case of pilot handover [M? L?]	<b>REQ-HUM-INT-05-01:</b> Interaction between remote pilots and controller(s) shall be taken into account when pilots handover is performed These aspect shall be covered by training [HUM-TRA-01, 02]
HUM-AUT-01 Optimised Automation support [S/M/L]	<b>REQ-HUM-AUT-01-01:</b> Roles and responsibilities shall be clearly assigned to the human and the system and the manner in which they are expected to collaborate is to be made clear, both in nominal situations and in non-nominal situations (e.g. during automation degradation). These roles and responsibility are strongly dependent on system automation level, so they must be assessed during the system design. It is important for specific RPAS issues like automated collision avoidance systems or automated recovery actions in the case of loss of C2 link.
HUM-AUT-02 Use of automated systems [S/M/L]	<b>REQ-HUM-AUT-02-01:</b> Procedures for the use of automated systems by the operator should be designed and adopted, both for the nominal situation, and especially also for the non-nominal situations (e.g. automation degradation or failure).

Enabler	Requirements
HUM-ROL-01 Remote pilot responsibilities [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-ROL-01-01:</b> Remote pilots responsibilities shall be clearly defined also in non-nominal situations, like loss of communication link. [INS-ICAO-01]
HUM-ROL-02 RPA observer responsibilities [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-ROL-02-01:</b> RPA observer responsibilities shall be clearly defined also in non-nominal situations, like loss of communication link. [NEED-AHR-002]
HUM-ROL-03 RPA payload operator responsibilities [C/S/M/L]	<b>REQ-HUM-ROL-03-01:</b> RPA payload operator shall be clearly defined also in non-nominal situations, like pilot sickness. [NEED-AHR-002]

### Automation and Human Role Needs

Automation and Human Role			
Operational Need Reference	Operational Need Description	Rationale	Applicable Scenarios
NEED-AHR-001	Additional air traffic controllers' training for integration of RPAS in non-segregated airspace	Additional training requirements for air traffic controllers and other ATC personnel must include specific topics related to RPAS integration in non-segregated airspace: RPA performance, behaviour, communication, operational limitations, standard and emergency procedures, remote pilot handover.	All

Automation and Human Role			
Operational Need Reference	Operational Need Description	Rationale	Applicable Scenarios
NEED-AHR-002	Roles and Responsibilities definition in RPAS crew	In addition to the remote pilot, new roles need to be defined. An example of new role is “RPA observer”, an individual who, by visual observation of the RPA, assists the remote pilot in the safe conduct of the flight. Tasks and responsibilities need to be clearly defined for each role.	All (for each of them different roles)
NEED-AHR-003	Licensing	Specific licenses need to be released to remote pilot and other RPAS crew members.	All
NEED-AHR-004	Crew Training	Remote pilots and other members of the remote crew need to be trained in accordance with ICAO Annex 1. Specific adjustments to training procedures are needed considering the particular and unique nature and characteristics of the remote pilot station environment and RPA applications	All

## Riferimenti Bibliografici

- ANACNA. (s.d.). Tratto il giorno ottobre 15, 2012 da Sito web di ANACNA: [www.anacna.it/documents/beginners/separazioni.pdf](http://www.anacna.it/documents/beginners/separazioni.pdf)
- Andreatta, G., & Brunetta, L. (1998). Multiairport ground holding problem: A computational evaluation of exact algorithms. *Operations Research*, 46(1), 57-64.
- Arca Project Consortium. (s.d.). *Pagina web del progetto*. Tratto il giorno Ottobre 15, 2012 da [http://www.dblue.it/?post\\_type=post&p=146](http://www.dblue.it/?post_type=post&p=146)
- Archibald, J., Hill, J., Jepsen, N., Stirling, W., & Frost, R. (2008). A Satisficing Approach to Aircraft Conflict Resolution. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6), 775-779.
- Bellomi, F., Bonato, R., Nanni, V., & Tedeschi, A. (2008). Satisficing Game Theory for Conflict Resolution and Traffic Optimisation. *Air Traffic Control Quarterly*, 16(3), p. 211-233.
- Bertsimas, D., & Odoni, A. (1997). *A critical survey of optimization models for tactical and strategic aspects of air traffic flow management*. NASA Ames Research Center.
- Boterenbrood, H. (2000). *CANOpen: high-level protocol for CAN-bus*. National Institute for Nuclear Physics and High Energy Physics, Computer Technology, Amsterdam.
- Chaloulos, G., Roussos, G., Lygeros, J., & Kyriakopoulos, K. (2008). Ground Assisted Conflict Resolution in Self-Separation Airspace. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*. Honolulu, Hawaii.
- Civil Aviation Authority - Safety Regulation Group. (2012, August). *Cap772: Unmanned Aircraft System Operations in UK Airspace - Guidance*. Tratto il giorno Ottobre 15, 2012 da [www.caa.co.uk/docs/33/cap722.pdf](http://www.caa.co.uk/docs/33/cap722.pdf)

- Clark, C. M., Rock, S. M., & Latombe, J. C. (2003). Motion Planning for Multiple Mobile Robots using Dynamic Networks. *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)*. Taipei, Taiwan.
- Cuevas, G., Echegoyen, I., J., G., Casek, P., Keinrath, C. W., Gotthard, P., et al. (2009, Maggio). *Autonomous Aircraft Advanced (A3) ConOps*", *iFly Deliverable D1.3*. Tratto il giorno Ottobre 15, 2012 da [iFly.nlr.nl](http://iFly.nlr.nl)
- Edwards, E. (1972). Man and machine: Systems for safety. *Proc. of British Airline Pilots Associations Technical Symposium* (p. 21-36). London: British Airline Pilots Associations.
- Edwards, E. (1988). *Human Factors in Aviation*. San Diego, CA: Academic Press.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37(1), 32-64.
- Erdmann, E., & Lozano-Perez, T. (1987). On Multiple moving Objects. *Algorithmica*, 2, 477-521.
- Erzeberger, H. (2006). Automated Conflict Resolution for Air Traffic Control. *25th Int. Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS'06)*.
- EUROCAE WG73. (s.d.). *EUROCAE Working Group 93*. Tratto il giorno Ottobre 15, 2012 da [www.eurocae.net/working-groups/wg-list/89-wg-93.html](http://www.eurocae.net/working-groups/wg-list/89-wg-93.html)
- Eurocontrol Performance Review Commission. (2012). *Performance Review Report covering the calendar year 2011 (PRR 2011)*. Brussels: Eurocontrol.
- Eurostars Secretariat. (s.d.). Tratto il giorno Ottobre 15, 2012 da <http://www.eurostars-eureka.eu/>
- Frazzoli, E., Mao, Z., Oh, J., & Feron, E. (2001). Resolution of Conflicts Involving Many Aircraft via Semidefinite Programming. *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 24(1), 79-86.
- Gertler, J. (2012). *U.S. Unmanned Aerial Systems*. Washington: Congressional Research Service.
- Go, K., & Carroll, J. (2004). The blind men and the elephant: Views of scenario based system design. *Interactions*, 11(6), 44-53.
- Google Inc. (s.d.). Tratto il giorno Ottobre 15, 2012 da Google Earth: [earth.google.com](http://earth.google.com)
- Hawkins, F. H. (1993). *Human Factors in Flight (2nd Edition)*. Hants, UK: Gower Technical Press.

- Hayes, T., & Tatham, C. (1989). *Focus group interviews: A reader* (Second ed.). Chicago: American Marketing Association.
- Hill, J., Johnson, F., Archibald, J., Frost, R., & Stirling, W. C. (2005). A Cooperative Multi-Agent Approach to Free Flight. *AAMAS 2005, '4th Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agents Systems'*. Utrecht, Netherlands.
- Hu, J., Prandini, M., Nilim, A., & Sastry, S. (2002). Optimal coordinated maneuvers for three dimensional aircraft conflict resolution. *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 25(5), 888-900.
- ICAO. (2008). Operation of Aircraft - International General Aviation Aeroplanes. *Annex 6, 2, VII*.
- ICAO. (2011). Circular 328: Unmanned Aircraft Systems (UAS). Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization.
- ICONUS Project Consortium. (2012). *ICONUS Concept of Operations for UAS in SESAR*.
- Irvine, R. (2009). Comparison of pair-wise priority-based resolution schemes through fast-time simulation. *8th Innovative Research Workshop & Exhibition*.
- Jarke, M., Bui, X. T., & Carroll, J. M. (1998). Scenario Management: An Interdisciplinary Approach. *Requirements Engineering*, 3, 155-173.
- JSBSim. (s.d.). Tratto il giorno Ottobre 15, 2012 da JSBSim Website: [jsbsim.sourceforge.net](http://jsbsim.sourceforge.net)
- Kahne, S., & Frolow, I. (1996). Ait Traffic Management: Evolution with Technology. *IEEE Control Systems Magazine*, 16(6), 12-21.
- Kontio, J., Lethola, L., & Bragge, J. (2004). Using the Focus Group Method in Software Engineering:. *Proceedings of the International Symposium on Empirical Software Engineering*. Redondo Beach, U.S.A.: IEEE Computer Society.
- Krueger, R., & Casey, M. (2000). *Focus groups: A practical guide for applied research* (Third ed.). Thousand Oaks, CA, USA.
- Kuchar, J. K., & Yang, L. (2000, December). A review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, 1(4).
- Lukovic, M. (2011, Giugno 28). *The Future of the Civil and Military UAV Market*. Tratto il giorno Ottobre 15, 2012 da Frost&Sullivan: [www.frost.com/sublib/display-market-insight-top.do?id=236443867](http://www.frost.com/sublib/display-market-insight-top.do?id=236443867)

- Mazzetti, M. (2012, Luglio 8). The drone zone. *The New York Times Magazine*, p. 32.
- MIDCAS Consortium. (2010). *D2.1.1-8 Stakeholder Requirement Synthesis*.
- MIDCAS Project. (s.d.). Tratto il giorno Ottobre 15, 2012 da [www.midcas.org](http://www.midcas.org)
- NextGEN. (s.d.). Tratto il giorno Ottobre 15, 2012 da Sito web del programma NextGEN: [www.faa.gov/nextgen/](http://www.faa.gov/nextgen/)
- Rind, D. (1999). Complexity and climate. *Science*, 284(5411), 105-107.
- Rosson, M. B., & Carroll, J. M. (2003). Scenario based design. In *The human-computer interaction handbook* (p. 1032-1050). Hillsdale, NJ, USA: L. Erlbaum Associates Inc.
- Saleh, K., & Al-Zarouni, A. (2004). Capturing Non-Functional Software Requirements Using The User Requirements Notation . *The 2004 International Research Conference on Innovations in Information Technology*, (p. 222-230). Dubai, UAE.
- SESAR Joint Undertaking. (s.d.). Tratto da Sito istituzionale di SESAR Joint Undertaking: [www.sesarju.eu](http://www.sesarju.eu)
- Stagi, L. (2000). Il focus group come tecnica di valutazione. Pregi, difetti, potenzialità. *Rassegna italiana di valutazione*(20), 67-88.
- Stamper, W. (2005, December). Understanding mode S technology. *Defense Electronics*.
- Stirling, W. C. (2003). *Satisficing Games and Decision Making with Applications to Engineering and Computer Science*. Cambridge University Press.
- Taraglio, S., Nanni, V., & Taurino, D. (2011). A Safe Solution to Introduce UAVs into Non Segregated Areas. *ATACCS 2011 Conference Proceedings*, (p. 131-136). Barcelona, Spain.
- Taraglio, S., Nanni, V., & Taurino, D. (2012). Hardware On-Board Implementation Of A Possible Solution To Introduce UAVs Into Non Segregated Areas. *Proceedings of ICINCO 2012 9th International Conference on Informatics in Control Automation and Robotics*. Rome, Italy.
- Taurino, D., Frau, G., Beato, V., & Tedeschi, A. (2011). ADS-B Based Separation Support for General Aviation. *ATACCS 2011 Conference Proceedings*, (p. 104-109). Barcelona, Spain.
- Taurino, D., Taraglio, S., Tedeschi, A., Pasquini, A., & Nanni, V. (2010). Increasing the Autonomy of Unmanned Aircraft Veichles with a Game Theory Approach. *The Proceedings of ICIUS 2010*. Bali, Indonesia.

- Taurino, D., Taraglio, S., Tedeschi, A., Pasquini, A., & Nanni, V. (2011). Satisficing Game Theory for Enriching Autonomy in Unmanned Aerial Vehicles. *International Journal of Artificial Intelligence, Special Issue in Intelligent Unmanned Systems*, 316-328.
- Taurino, D., Tedeschi, A., Sánchez, A., Flores, A., Sysala, R., Suchánek, P., et al. (2010). Adaptive Routing And Conflict Management For Unmanned Aircraft Vehicles. *IASTED Technology Conferences 2010 Proceedings*. Boston, USA.
- UVS International. (2012). *2012-2013 RPAS Yearbook (X ed.)*. Parigi, Francia: Blyenburgh & Co.
- Weiss, A. (2002, Novembre 1). *Dhrystone Benchmark: History, Analysis, "Scores" and Recommendations*. Tratto il giorno Ottobre 15, 2012 da [www.johnloomis.org/NiosII/dhrystone/ECLDhrystoneWhitePaper.pdf](http://www.johnloomis.org/NiosII/dhrystone/ECLDhrystoneWhitePaper.pdf)
- Weng, G., Bhalla, U., & Iyengar, R. (1999). Complexity in Biological Signaling Systems. *Science*, 284(5411), 92-96.
- Wiki of Science. (s.d.). Tratto il giorno Ottobre 15, 2012 da [wikiofscience.wikidot.com/technology:shell-model-of-human-factors](http://wikiofscience.wikidot.com/technology:shell-model-of-human-factors)
- Wikipedia, Servizio di controllo del traffico aereo*. (s.d.). Tratto il giorno Ottobre 15, 2012 da [Wikipedia Italia: http://it.wikipedia.org/wiki/Servizio\\_di\\_controllo\\_del\\_traffico\\_aereo](http://it.wikipedia.org/wiki/Servizio_di_controllo_del_traffico_aereo)
- Wolpert, D. H., & Tumer, K. (2006). *An Introduction to Collective Intelligence*. Technical Report, NASA.