

POLITECNICO DI MILANO

SCUOLA DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E
TERRITORIALE



LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI MAGISTRALE

ADOZIONE DI UN SISTEMA A BLOCCHI
AUTOMATICI
CON ACTIVE ROUTING PER LA CIRCOLAZIONE A
TERRA DEGLI AEROMOBILI:
IL CASO STUDIO DI MILANO MALPENSA

Guglielmo PATERNESI
MATR. 919315

RELATORE:

Prof. Roberto MAJA *Politecnico di Milano*

CO-RELATORE:

Prof. Marco DIANA *Politecnico di Torino*

MILANO - 9 LUGLIO 2020

*Ai miei nonni Anna ed Alfredo,
per essere stati un il silente e fondamentale supporto di questi anni.
A mia sorella Giorgia,
per la vita condivisa, ai nostri sogni ed aspirazioni.
Ai miei amici Chiara e Federico,
per la loro presenza costante ed indispensabile nella mia vita, per avermi
insegnato che l'amicizia sia la cosa più preziosa che la vita abbia da offrirti,*

*A mio padre Gianni,
per la fiducia che ha sempre riposto in me, ai frutti del suo lavoro più
grande che ora raccoglie guardandoci da lassù.*

*A mia madre Tiziana,
per il suo affetto incondizionato e per essere l'esempio più grande di
coraggio e tenacia che la vita mi abbia dato finora.*

Sommario

Questo lavoro di tesi configura un sistema di distanziamento a blocchi automatici per aeromobili in rullaggio, con lo scopo di migliorare gli standard di capacità e sicurezza in tutte le condizioni di visibilità.

Inoltre, tramite la presentazione di un algoritmo di prescrizione in tempo reale delle velocità in pista, si evidenzia una possibilità di ottimizzazione del 18% per i consumi, del 30%, 31% e dell'11% rispettivamente per le emissioni di HC, CO, e NOx. Viene formalizzata la proposta di un incremento della velocità massima consentita in Taxiway Charlie.

Introduzione

La crescente domanda di trasporto aereo, assieme ai limiti tecnici e normativi legati all'ampliamento delle infrastrutture di volo già esistenti nel nostro territorio, impongono l'ottimizzazione delle odierne metodologie di gestione del traffico a terra al fine di assecondare al meglio le previsioni di crescita.

Alla luce anche delle vulnerabilità associate alla circolazione a terra, principalmente da imputare alla mancanza di sistemi automatici di verifica e retroazione, il sistema oggetto di questa tesi si concentra su una delle criticità fondamentali nell'ambito del controllo ATC: la comunicazione tra terra ed aereo, con lo scopo di:

- Migliorare la sicurezza
- Alleggerire il carico dei controllori di volo
- Ottimizzare i consumi di carburante
- Diminuire le emissioni inquinanti

Lo studio qui riportato descrive passo passo l'intero processo di ricerca e selezione delle informazioni che ha condotto alla configurazione di un sistema di automazione A-SMGCS adatto alle esigenze aeroportuali.

Il documento è diviso in una prima parte di inquadramento e descrizione del panorama normativo odierno, con riferimenti a metodologie di calcolo e di stima dei parametri di circolazione basate sui più recenti studi in materia; seguito da una seconda parte applicativa, dove i fondamenti scientifici descritti vengono applicati al caso studio creando una simulazione a seguito ad un'accurata raccolta e selezione di dati.

Con un programma creato ad-hoc viene valutata l'efficienza delle misure introdotte in termine di miglioramento dei consumi e delle emissioni e vengono definite le configurazioni di sicurezza e di allarme volte a mitigare i rischi di collisioni ed intrusioni in pista.

Durante l'intera trattazione ci si è impegnati a mantenere il focus su tematiche ambientali e di sicurezza, tentando di fondere l'obiettivo dell'efficienza economica con quello della prevenzione degli incidenti sul lavoro e della riduzione dell'inquinamento, nell'ottica di garantire un'alternativa agli odierni sistemi dal punto di vista della sostenibilità sociale, favorendo il progresso e migliorando la qualità del servizio offerto.

Parte I

La circolazione a terra: stato
dell'arte di un problema
complesso

La prima parte della trattazione è deputata alla determinazione dello stato dell'arte riguardante la circolazione a terra degli aeromobili. La complessità del sistema aeroportuale fa sì che le dinamiche di rullaggio di un aeromobile siano direttamente collegate al processo completo di turn-around, comprensivo di tutte le operazioni volte ad assicurare il servizio di trasporto aereo.

Per una trattazione esaustiva dell'argomento sarà di seguito descritto il complesso normativo, economico e tecnologico delle procedure di circolazione a terra, caratterizzato da molteplici attori più o meno subordinati tra loro.

Inizialmente il panorama normativo verrà definito, evidenziando i principali normatori mondiali ed europei in materia.

All'interno di questo capitolo verranno inoltre definite ed indagate le inefficienze tipiche degli schemi di rullaggio, definendo equazioni che saranno utili successivamente alla trattazione del modello di ottimizzazione.

Il secondo capitolo presenterà lo stato dell'arte in materia tecnologica, presentando principi e tecnologie innovative nell'ambito dei sistemi A-SMGCS ed evidenziando il ruolo cruciale della comunicazione aeroportuale, oggetto di fondamentale importanza nella trattazione della tesi.

Infine, l'ultimo capitolo si soffermerà sul concetto più vasto di capacità aeroportuale, per comprendere a pieno il ruolo della circolazione a terra nel complesso delle operazioni di trasporto e definire l'approccio seguito nel caso studio.

Capitolo 1

Recenti evoluzioni della circolazione a terra

In questo capitolo viene definito nel dettaglio il complesso normativo che regola le procedure di circolazione a terra. Uno studio dei principali normatori mette a disposizione gli strumenti necessari per la comprensione dello stato di innovazione delle tecnologie rispetto agli altri sistemi di trasporto.

La tematica della comunicazione tra terra e aereo è inoltre analizzata, evidenziando i motivi storici per cui questa ricopra un ruolo fondamentale nella circolazione aeroportuale ed identificando le principali problematiche connesse ad essa.

Infine le principali inefficienze, assieme ai loro metodi di stima, sono qui definite e descritte nel dettaglio, riportando dati ed equazioni dai più recenti studi in materia.

1.1 Il complesso normativo

1.1.1 Il ruolo dell'ICAO

Il panorama normativo internazionale è soprasseduto dall'ICAO (International Civil Aviation Organization), organizzazione istituita dalla Conferenza di Chicago nel 1944.

Essa è composta da 191 stati membri, raggruppati in diversi organi di governance, tra cui un'Assemblea, un Consiglio ed un Segretariato, con diverse funzioni. In linea generale, l'ICAO è responsabile per:

- Sicurezza
- AirWorthiness
- Prevenzione dello Spreco di Risorse
- Libera Competizione
- Normative Tecniche
- Legislazione Aerea

Ed ha una funzione di coordinamento e governance tra i singoli stati membri, tra le diverse organizzazioni delle United Nations come WMO, ITU, WHO, IMO e tra le organizzazioni non governative come la IATA, l'ACI, o la IFALPA.

Le normative e le raccomandazioni ICAO sono raccolte in 19 Annessi. Per la nostra trattazione, l'annesso di riferimento è il 14-Aerodromes [25].

In aggiunta all'annesso l'organizzazione fornisce, in seguito a significativi progressi nell'industria aerea, tutta una serie di pubblicazioni complementari volte ad approfondire determinati aspetti. Ai fini di questa trattazione, verrà più volte citato il Manuale A-SMGCS, documento 9830 [23].

1.1.2 Il ruolo dell'EUROCONTROL

L'EUROCONTROL è un'organizzazione intergovernativa formata da 40 componenti più una rappresentanza della Comunità Europea, per un totale di 41 stati membri.

È governata da una convenzione internazionale e si divide principalmente in 3 diversi componenti: due governativi ed uno esecutivo.

EUROCONTROL lavora con i partner per la costituzione di un cielo unico europeo, per migliorare la sicurezza, la capacità e le performance dell'industria aerea, lavorando congiuntamente alle autorità nazionali dell'aviazione civile e i fornitori di servizi di controllo del traffico aereo.

L'organizzazione apporta un ruolo fondamentale nello sviluppo del progetto SESAR (Single European Sky ATM Research), che nell'immaginario della commissione europea preparerà le moderne infrastrutture ad accogliere un incremento del 300% del traffico aereo europeo nei prossimi 30 anni.

EUROCONTROL produce documentazione tecnica per la creazione di sistemi e procedure efficienti e condivise.

Per la nostra trattazione, particolare attenzione sarà data alle valutazioni di applicabilità delle tecnologie A-SMGCS [12], alle specificazioni di servizi e requisiti di implementazione A-SMGCS [16] e alla sua bozza di aggiornamento in approvazione nei prossimi mesi [17].

Il progetto ITWP e l'influenza del fattore umano

Nell'ambito del controllo del traffico aereo merita particolare attenzione la tendenza all'adozione di interfacce (Human-Machine Interfaces) che permettano al dipendente di disporre di una visione complessiva dello stato del sistema tale per cui operare delle decisioni che considerino tutte le componenti dell'airside.

In merito, l'EUROCONTROL ha lanciato il progetto Integrated Tower Working Position (ITWP), parte fondamentale del programma europeo a medio termine. Il progetto vede i meccanismi A-SMGCS descritti in questa tesi come struttura fondamentale per l'ottimizzazione del carico di lavoro dei controllori.

Essi provvedono alla raccolta dei dati dalla pista di volo, che vengono poi rappresentati sull'interfaccia, e permettono di trasmettere le decisioni agli aeromobili senza la necessità di comunicazione radio.

Questa ultima viene però mantenuta nel caso in cui il sistema evidenzi potenziali conflitti o violazioni di prescrizioni da parte degli aeromobili, permettendo al controllore di intervenire.

1.2 La comunicazione terra-aereo in ambito aeroportuale

1.2.1 Breve storia degli strumenti di comunicazione aeroportuale

Prima dell'adozione dei sistemi radio, la comunicazione tra terra ed aereo era organizzata secondo segnali manuali. Un operatore a terra disponeva segnali che venivano interpretati dal pilota, secondo standard non univocamente determinati.

Il linguaggio cambiava continuamente in relazione alla frammentazione politica dei diversi territori e alle relazioni tra stati. Per comunicare con la terraferma, i piloti compivano un giro sopra il campo di volo e lasciavano cadere, attaccati ad un oggetto più pesante, pezzi di carta con le informazioni che volevano trasmettere.

Con l'avvento della radio, le comunicazioni hanno stabilito quella connessione tra il veicolo e il controllo aereo che al giorno d'oggi risulta vitale per l'organizzazione delle odierne condizioni di traffico. L'ottimizzazione della comunicazione via radio e la ridondanza dei segnali, accompagnata da procedure di comunicazione precise, favoriscono la soddisfazione di una domanda crescente e la soddisfazione degli standard di sicurezza. Senza un sistema in grado di prescrivere informazioni ed istruzioni in così poco tempo sarebbe impossibile mantenere i distanziamenti ora impiegati senza porre una forte minaccia alla sicurezza. [36]

L'introduzione dei computer negli anni '70 ha inizializzato quel processo di automazione e di affidamento alle macchine del controllo aereo che è tuttora in fase di evoluzione. Recentemente, le tendenze di innovazione sono accompagnate da una proattiva attività di ricerca su questo argomento.

1.2.2 Tendenze di innovazione nell'ambito comunicazione a terra

Considerando le previsioni di traffico nei prossimi anni, i grandi investimenti necessari a rivedere il layout di un'infrastruttura aeroportuale per adattarla alle crescenti domande di traffico e ai grandi vincoli normativi sul consumo di suolo, le più recenti tendenze di innovazione tecnologica ci portano verso l'adeguamento dei sistemi di management della circolazione a terra agli standard di automazione già raggiunti per altri sistemi di trasporto come

1.2. LA COMUNICAZIONE TERRA-AEREO IN AMBITO AEROPORTUALE¹¹

ferrovie o autostrade, di modo da ottimizzare la fruizione della pista senza la costruzione di nuove taxiway.

In merito a questo, il manuale ICAO sull'adozione di sistemi informatici di controllo e guida ai movimenti di superficie del 2004 [23] già si inquadrava in una serie di provvedimenti volti all'innovazione della comunicazione e dell'organizzazione delle partenze tramite i sistemi A-SMGCS.

La ragione di questo interesse, mostrato principalmente dagli aeroporti americani dove si concentra una buona parte del traffico mondiale, risiede nei grandi margini di miglioramento dei sistemi di comunicazione tra torre di controllo e velivolo.

Infatti, il vantaggio di fruizione di un'infrastruttura di comunicazione più efficiente si ripercuote in maniera positiva su tutti gli attori coinvolti nell'erogazione del servizio aeroportuale:

- Il gestore aeroportuale, che ne trae un aumento del livello di servizio
- La compagnia aerea, che ne trae una diminuzione dei ritardi ed un risparmio di carburante
- I passeggeri, che usufruiscono di un servizio più sicuro, puntuale ed affidabile
- L'ambiente, riducendo le emissioni inquinanti

1.2.3 La comunicazione nei sistemi di trasporto

Per poter procedere alla configurazione del sistema oggetto di questa tesi, vale la pena analizzare le differenze e i vantaggi degli approcci all'automazione relativi agli altri mezzi di trasporto.

Al giorno d'oggi i sistemi automatizzati sono ampiamente utilizzati per ottimizzare i distanziamenti, prevedere situazioni di collisione, sorvegliare sulla marcia del conducente ed eventualmente intervenire. Questi sistemi sono presenti sia in sistemi a guida vincolata come le ferrovie sia in sistemi a guida libera come tutti i trasporti su gomma, in maniera più o meno avanzata a seconda del modello di veicolo considerato.

Negli anni si sono ottenuti incoraggianti risultati in termini di aumento di sicurezza ed efficienza dei sistemi di trasporto.

Al contrario del trasporto ferroviario, dove l'automazione può essere considerata in stato relativamente maturo, l'ambiente aeroportuale ha incontrato resistenze prevalentemente da imputare a:

- Precisi protocolli di sicurezza
- Difficoltà di coordinamento tra aeroporti situati in diversi paesi
- Difficoltà di coordinamento tra progettisti dell'infrastruttura di circolazione a terra e progettisti dei veicoli
- Elevati costi di implementazione
- Crescente domanda ed impulso all'innovazione solamente negli ultimi 10-15 anni

Inoltre, la fase di collaudo necessaria all'implementazione è condizionata dai grandi rischi in gioco. Risulta quindi più difficile l'adozione di nuove tecnologie: ogni investimento deve considerare un periodo di prova molto lungo prima di poter mostrare i suoi frutti.

«Could air traffic controllers be replaced by automated systems altogether one day? Both experts say that although the systems are proven to increase efficiency, for the next 20 years at least, humans will remain in charge.»

The role of automation in air traffic control, Airport Technologies, 11 Luglio 2018 [2]

Particolare influenza nella definizione dello stato di sviluppo delle tecnologie è tuttavia da imputare a motivi storici.

Lo sviluppo della comunicazione automatizzata in ambito ferroviario è dovuto alla necessità di dover comunicare a distanza delle prescrizioni quando la radio non era ancora una tecnologia sufficientemente sviluppata. Unitamente alla grande quantità di flussi, alle grandi velocità e spazi di frenatura in gioco e con l'obiettivo di ridurre i distanziamenti per sfruttare al meglio la capacità della linea, risultava impossibile per il controllore di traffico andare a prescrivere in tempo reale le prescrizioni di traffico.

La spinta all'innovazione ha portato alla definizione di un controllo del tutto automatizzato per il traffico in linea, dove i treni mantengono il distanziamento longitudinale grazie ad un sistema di segnalazione visiva a blocchi. Per la circolazione in stazione, al contrario, vista la quantità considerevole di potenziali conflitti generati dall'intersezione delle traiettorie, un controllore configura in remoto gli itinerari da seguire.

Per ognuno di questi due tipi di circolazione, la comunicazione diretta tra il controllore ed il pilota non è presa in considerazione, snellendo le procedure e designando il controllore del traffico ad un ruolo di definizione dei

*1.2. LA COMUNICAZIONE TERRA-AEREO IN AMBITO AEROPORTUALE*¹³

percorsi e controllo della sicurezza. Il segnalamento è dunque responsabile della trasmissione del messaggio.

Al momento dello sviluppo del trasporto aereo però, la radio presentava un'alternativa migliore per la sua possibilità di coprire distanze maggiori in mancanza di un'infrastruttura fisica. Al giorno d'oggi e alla luce delle tecnologie disponibili, un ripensamento delle tecnologie utilizzate per la gestione della circolazione può risolvere le principali inefficienze legate all'odierno sistema.

1.3 Metodi di quantificazione delle inefficienze

Al giorno d'oggi i sistemi di comunicazione via radio sono considerati responsabili delle più marcate inefficienze aeroportuali.

Gli impatti derivanti dalla configurazione intrinseca del sistema si palesano soprattutto in situazioni meteo avverse e/o di congestione, e sono dovuti a:

- Impossibilità di verifica visiva in condizioni di visibilità ridotta
- Alto rapporto tra controllori di volo e aeromobili in rullaggio e dunque difficoltà di coordinamento
- Lentezza delle operazioni di trasmissione del messaggio
- Mancanza di sistemi di supporto adeguati nella cabina di pilotaggio

Le principali conseguenze che da essi derivano sono:

- Elevati consumi di carburante
- Impatto Ambientale
- Aumento costi di gestione e ritardi
- Rischio di collisioni con ostacoli o in caso più grave, veri e propri incidenti tra aeromobili

1.3.1 Consumo di carburante

La stima del carburante bruciato nella fase di circolazione a terra gioca un ruolo fondamentale nella determinazione del costo complessivo del volo. Stando agli indici di consumo carburante dell'ICAO, i motori di un aereo possono essere settati su quattro diversi valori di potenza a seconda della fase del volo [6].

1. Taxi
2. Take-Off
3. Climbing
4. Approach

A titolo esemplificativo, Si riporta il calcolo semplificato della percentuale di carburante consumato in rullaggio da un aereo di categoria C. Per un motore CFM56-7B Engines montato su un Boeing 737-800 (189 pax, 78.245kg MTOW), secondo la relazione ICAO sulle prestazioni dei motori [26] la spinta erogata nelle diverse fasi di volo è:

- 7% Taxi
- 27% Fase di discesa
- 80% Fase di salita
- 100% Fase di Decollo

Semplificando e considerando dunque un volo composto da una fase di rullaggio di 26min [24] a potenza 7% e da una fase a regime di durata 1.5h a potenza 55% (intesa come media tra fase di salita e di approccio), con un consumo di carburante γ lineare rispetto alla potenza erogata, si ottiene il seguente consumo percentuale:

$$\frac{\text{Consumo Carburante}_{Rullaggio}}{\text{Consumo Carburante}_{Tot}} = \frac{\gamma * P_{Rullaggio} * t_{rullaggio}}{\gamma * P_{Rullaggio} * t_{Rullaggio} + \gamma * P_{Regime} * t_{Regime}}$$

$$\frac{\text{Consumo Carburante}_{Rullaggio}}{\text{Consumo Carburante}_{Tot}} = \frac{0.07 * 0.43}{0.07 * 0.43 + 0.55 * 1.5} = 0.035 = 3.5\% \quad (1.1)$$

Con:

$\gamma = \text{Consumo di carburante rispetto alla potenza erogata, valore costante}$

Risulta quindi che la fase di rullaggio a terra su un volo di un'ora e mezza incide orientativamente per una percentuale del 3.5% sul costo del carburante di volo, che a sua volta è una delle principali voci di costo. Ne sussegue che l'ottimizzazione delle traiettorie a terra per diminuire la quantità di carburante bruciato sia fondamentale per le politiche di costo delle singole aerolinee.

Per applicare delle strategie volte ridurre la quantità di carburante bruciato in fase di taxi è necessario comprendere le principali cause che determinano il consumo di carburante in pista.

Indici di flusso ICAO

L'ICAO fornisce dei Fuel Burn Index per ogni tipologia di motore al variare delle diverse potenze. Nell'Appendice D sono raccolti i dati relativi ai motori considerati in seguito.

Regressione sui dati aeroportuali

Secondo uno studio condotto da Khadilkar [29], i principali eventi da considerare per determinare il flusso di carburante, in ordine di importanza, sono:

- Durata del Taxi-Time
- Numero di accelerazioni maggiori a 1.5 m/s^2 , prolungati per un minimo di 5s

$$\frac{f}{\sqrt{T_{amb}}} = a_1 + b_1 * t + c_1 * n_a \quad (1.2)$$

Dove:

f = flusso di carburante per ogni motore

t = tempo totale di rullaggio

n_a = numero di accelerazioni maggiori di 1.5 m/s^2

a_1, b_1 e c_1 = coefficienti di calibrazione del modello ricavabili tramite regressione lineare

T_{amb} = temperatura esterna.

Modello lineare

Secondo il report Nasa APEX [52], il flusso di carburante può invece considerarsi lineare con la potenza erogata. Come valore di potenza possiamo utilizzare la stima di Stettler, Eastham e Barrett che considera un valore compreso tra il 4% (fase di rullaggio a velocità costante) e il 17% (fase di rullaggio con accelerazione). Valori di potenza attorno al 10% sono abitualmente superati in occasioni forti curve o accelerazioni, derivanti dall'attraversamento di Runway o dai fenomeni di start and stop.[45] La linea di tendenza del seguente grafico è:

$$y = 0.0173x + 0.1246$$

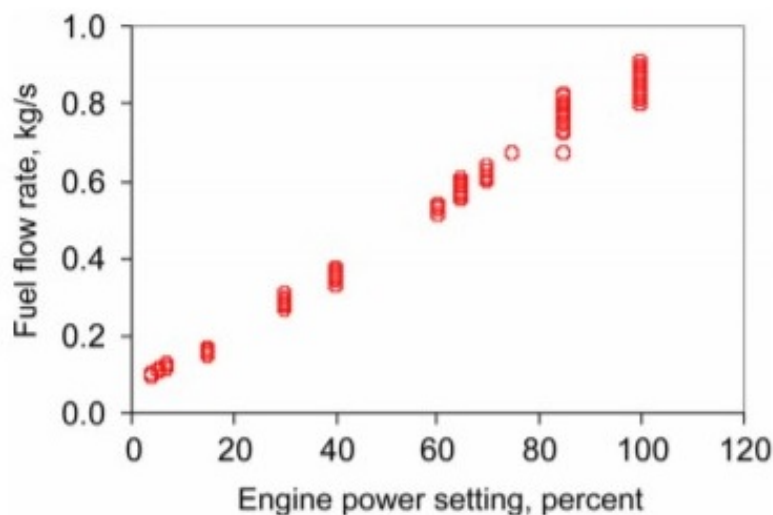


Figura 1.1: Relazione tra il Fuel Flow e la potenza di funzionamento

Regressione sui diagrammi di trazione

Nel caso in cui non si volessero applicare i coefficienti suggeriti dagli studi qui menzionati, la lavorazione dei dati per la determinazione dei coefficienti è vincolata alla disponibilità dei singoli diagrammi di trazione con i relativi consumi per gli aerei in rullaggio sulla pista considerata, dai quali, per regressione, è possibile estrarre i valori di carburante bruciato in relazione alla spinta adottata.

Modelli alternativi

In alternativa, per una valutazione più semplicistica si possono considerare i dati di consumo riportati dall'annesso F dell'European cost reference values dell'università di Westminster [9].

In questo caso la dipendenza del consumo di carburante è funzione solo del tempo di rullaggio, a scapito della precisione della stima ma a beneficio della semplicità di calcolo.

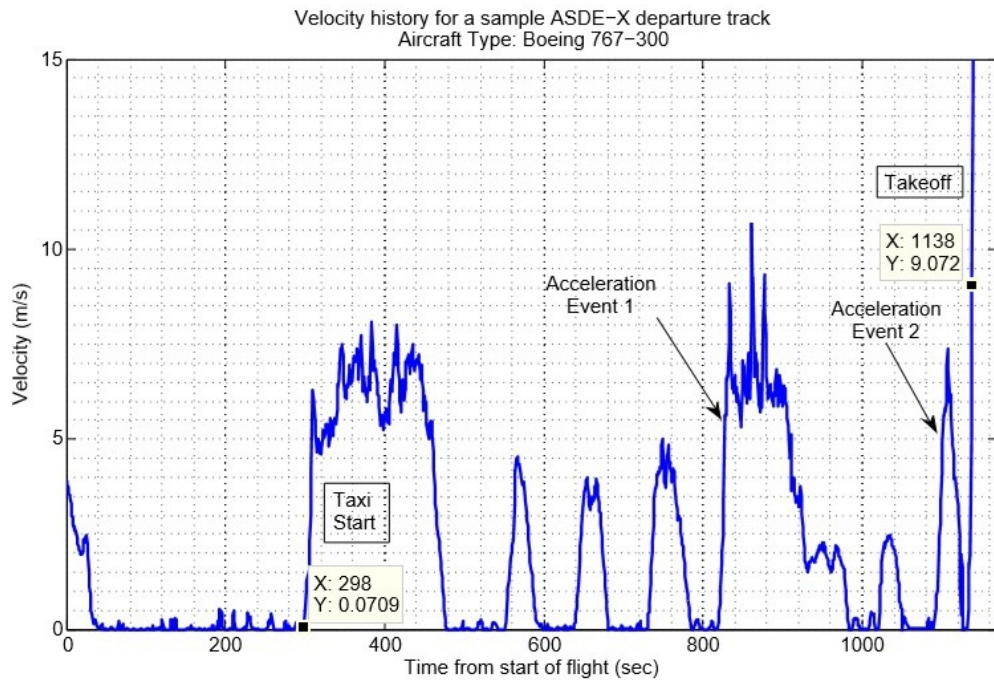


Figura 1.2: Esempio di Profilo di Velocità

Modello adottato per le analisi successive

Per la seguente trattazione, sarà utilizzato un modello di interpolazione lineare tra i valori dei Fuel Burn Index estratti dal Database ICAO. La scelta dello schema di consumo permette infatti di disporre di una relazione ad-hoc per ogni tipo di aeromobile in circolazione e per ogni fase del moto.

1.3.2 Impatto ambientale

L'aviazione impatta l'ambiente prevalentemente tramite:

- Emissioni rumorose
- Emissioni inquinanti

Con particolare riguardo alle condizioni di circolazione a terra, andiamo ad approfondire il tema delle emissioni inquinanti per valutare la quantità e la natura degli inquinanti emessi in atmosfera.

Vale la pena ricordare che i risultati della reazione di combustione del comburente dell'aereo contengono un mix di sostanze più o meno pesanti, la cui

natura dipende dal regime di funzionamento del motore.

Una ricerca condotta presso l'aeroporto internazionale di Beijing descrive la percentuale di emissione degli inquinanti tipici dei motori termici in relazione alla fase di rullaggio dell'aeromobile [54] (Figura 1.3). A regimi di funzionamento a potenze minori (i.e. Taxi) sono associate emissioni più concentrate di particelle pesanti, prevalentemente incombusti.

Questo fenomeno è dovuto alla mancanza di ossigeno in misura tale da ossidare in maniera completa il combustibile quando si opera a basse potenze.

Al contrario, le alte potenze sono caratterizzate da flussi di ossigeno maggiori che reagiscono in misura maggiore con il carburante per rilasciare energia dividendo le molecole in particelle più piccole.

Come conseguenza ai regimi in bassa potenza tipici del rullaggio, in uscita da un motore possiamo osservare[39]:

- Monossido di carbonio (CO), il risultato dell'ossidazione parziale delle catene di idrocarburi presenti nel combustibile bruciato all'interno dei motori
- Idrocarburi, conseguenza della mancata combustione dovuta alle basse potenze.

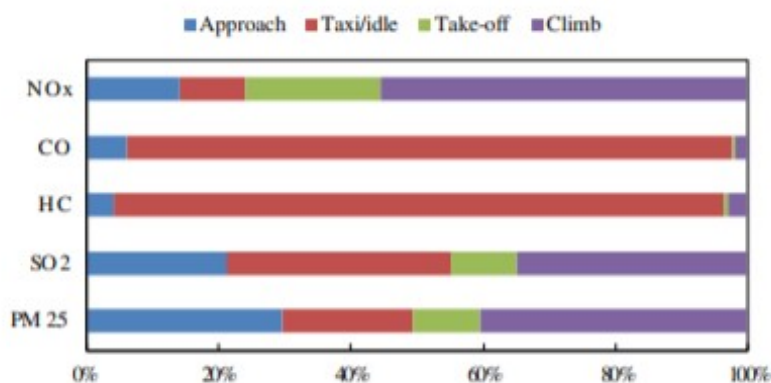


Figura 1.3: Causa delle Emissioni dei Principali Inquinanti [54]

Al contrario, in alta potenza possiamo notare:

- Ossidi di Azoto (NOx), composti gassosi che si formano ogni volta che l'aria viene riscaldata al di sopra dei 1.400° C. Alle alte temperature l'azoto presente nell'aria si trasforma in tre composti: protossido di azoto, ossido di azoto e biossido di azoto.

Per la valutazione della quantità di inquinante prodotto, per lo sviuppo di questa tesi ci si avvarrà della formula proposta da Yang, Shuiyuan e Cheng [54]:

$$E_{ij} = \sum (TIM_{jm} * 60) * \left(\frac{FF_{jm}}{1000}\right) * (EI_{jk}) * (NE_j) \quad (1.3)$$

Con:

E_{jk} = Emissione in g dell'inquinante "i" emesso dal tipo di aeromobile "j"

TIM_{jk} = Tempo di impiego dei motori dell'aeromobile di tipo "j" nella modalità "m" (takeoff, climbing, taxi and approach)

FF_{jk} = Flusso di carburante (kg/s) in ognuno dei motori relativi al tipo di aereo "j" nella modalità "m"

EI_{jk} = Indice di emissione (g/kg combusto) relativo all'aeromobile i tipo "j" nella modalità "m"

NE_j = Numero di motori sull'aereo di tipo "j"

Dove, per le nostre valutazioni la sommatoria sarà riferita delle fasi di accelerazione, crociera e decelerazione e l'unica modalità "m" considerata sarà quella di taxi. La valutazione dell'indice di emissione per i NOx, CO e HC, può essere stimata al dipendere del flusso di carburante dalla tabella in Figura 1.4. Per il modello creato per questa tesi, gli indici di emissione saranno ipotizzati lineari tra i valori riportati sul database ICAO. L'approssimazione introdotta si avvicina sufficientemente alle rilevazioni di Baughcum [6] in Figura 1.4

Valutazione del Danno

Per valutare il danno arrecato all'ambiente e alla salute dei cittadini dalla presenza di queste sostanze si devono analizzare le concentrazioni e le condizioni delle vicinanze aeroportuali. Si rimanda all'Handbook dell'Unione Europea in merito di costi ed esternalità dei trasporti [18] o allo studio della Columbia University che analizza l'insorgenza di patologie umane collegate all'esposizione ai vari inquinanti citati in questa tesi [39].

In conclusione, è dimostrato come la quantità di inquinante prodotto possa essere sensibilmente diminuita andando ad operare sul tempo di taxi

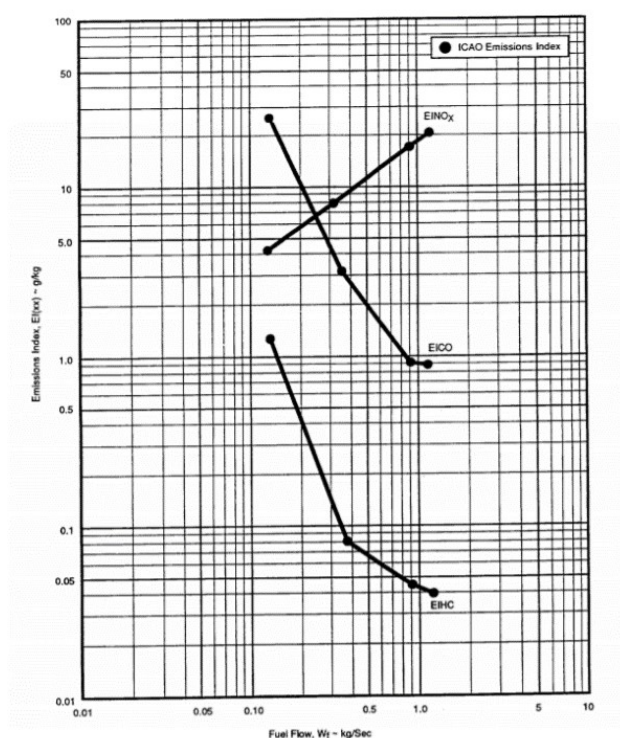


Figura 1.4: Tabella per la determinazione dell'Emission Index, al dipendere del Fuel Flow [6]

€/2016/kg	NH ₃	NMVOc	SO ₂	NO _x transport city*	NO _x transport rural*	PM _{2.5} transport metropole*	PM _{2.5} transport city*	PM _{2.5} transport rural*	PM ₁₀ average*
Greece	4.8	0.3	5.9	5.1	3.1	267	86	33	24.8
Hungary	18.9	0.8	9.9	26.8	15.8	317	102	59	8.5
Ireland	4.1	1.7	11.8	17.6	10.1	568	183	68	12.2
Italy	21.6	1.1	12.7	25.4	15.1	409	132	79	19
Latvia	8.7	0.4	4.8	7.2	4.4	251	81	28	17.2
Lithuania	7.9	0.6	6.4	12.1	7.1	300	98	38	27
Luxembourg	60.0	6.2	29.3	66.8	38.4	n.a.**	278	191	8
Malta	6.4	0.4	4.3	2.3	1.4	n.a.**	72	18	63.9
Netherlands	30.0	2.8	20.2	26.5	15.3	458	148	101	5.6
Poland	14.4	0.7	8.2	14.7	8.9	282	91	52	5.2
Portugal	4.3	0.5	4.1	2.8	1.7	292	94	39	47.3
Romania	9.4	0.5	7.3	19.4	11.2	272	88	42	16.1
Slovakia	24.4	0.7	10.1	24.8	14.7	328	105	59	12.3
Slovenia	23.8	1.2	9.2	22.3	13.7	n.a.**	93	52	12
Spain	6.4	0.7	6.8	8.5	5.1	348	112	46	10.2
Sweden	10.6	0.7	5.5	9.5	6	374	120	38	15.2
United Kingdom	17.6	1.4	10	13.6	7.9	380	122	65	16.2
EU28	17.5	1.2	10.9	21.3	12.6	381	123	70	22.3

Figura 1.5: Tabella per i costi degli inquinanti per i diversi paesi dell'Unione [18]

e sulla potenza dei motori, funzione a sua volta delle accelerazioni a cui è sottoposto il velivolo. Come evidenziato nel capitolo precedente, una significativa riduzione di questi due termini si riduce in un beneficio economico sia in termini di riduzione del carburante consumato sia considerando l'impatto socio-ambientale delle emissioni inquinanti.

1.3.3 Rullaggio e ritardi

Secondo lo studio "European Airline Delay Cost Reference Values" dell'università di Westminster [9], citato da EUROCONTROL come ricerca di riferimento nella valutazione del valore dei ritardi in ambito aeroportuale, il costo derivante dalla circolazione a terra è composto dai seguenti fattori:

- Passeggeri hard, come rimborsi e compensazioni (conseguenza dei ritardi)
- Passeggeri soft, come acquisto/perdita di clientela, buona/cattiva pubblicità (possibile conseguenza dei ritardi)
- Manutenzione
- Carburante
- Equipaggio
- Reazione a catena sui voli successivi (conseguenza dei ritardi)

Valutazione del danno

Prendendo in esame un aereo di tipo C si calcolano circa 20 Euro di costi per ogni minuto di ritardo.

Al netto del carburante utilizzato, i costi si abbassano a 9.8Euro/min. Il costo del carburante è stato rimosso in base al prezzo calcolato con i dati dell'annesso F dello stesso studio, di modo da ottenere una misura del costo del ritardo che non contenga indicazioni di carburante, per meglio adattarsi alle considerazioni delle analisi condotte nella seconda parte del lavoro.

Il costo del ritardo specifico per le operazioni Taxi è invece stimato a 15E/min (3.8E/min al netto del carburante), nell'ipotesi di un ritardo di 5 min e si alza a 47E/min per un ritardo di 15 min (35.8E/min al netto del carburante).

Secondo la Tabella 27 il valore del ritardo per ogni minuto cresce al crescere del ritardo, in quanto crescono in maniera non lineare i danni causati dal ritardo stesso[9].

1.3.4 Collisioni e Runway Incursion

Cause degli Incidenti Aeroportuali

Le possibili cause di incidenti in ambito aeroportuale possono essere:

- Condizioni meteo
- Layout aeroportuale
- Incolonnamento di aeromobili
- Utilizzo simultaneo di Runway incidenti
- Modifiche tardive alla scheda delle partenze
- Fraseologia non ufficiale
- Più linguaggi nelle comunicazioni ATC
- Carenze di competenza di lingua inglese
- Carico di lavoro

Evitando una trattazione più generale sulle possibili cause che portano al verificarsi di un incidente, dove in generale valgono precise soluzioni tecnologiche per la risoluzione delle problematiche, ci si vuole soffermare sull'aspetto del carico di lavoro, utile alla trattazione del documento. Esso può essere prevalentemente diviso in:

- Carico di lavoro del pilota
- Carico di lavoro dei controllori di volo

La curva che descrive la possibilità di errore dipendente dal carico di lavoro è indicata in Figura 1.6, dove a carichi di lavoro bassi entra in gioco il fattore della distrazione (A), muovendoci verso carichi intermedi si garantisce un servizio "Luxury"(B) e a carichi di lavoro alti si va incontro all'incapacità umana di coordinare un numero elevato di operazioni allo stesso momento, con ripetuti errori ed inefficienze (C,D ed E).[34]

Per quel che riguarda il pilota, il principale rischio è connesso alla mancata consapevolezza della situazione di traffico attorno a lui, conseguenza del numero di procedure che si devono attuare in fase di decollo/atterraggio e della contemporanea comunicazione con l'equipaggio, impegnato nelle operazioni di bordo. L'eccessivo carico di lavoro, causato anche dalla possibile

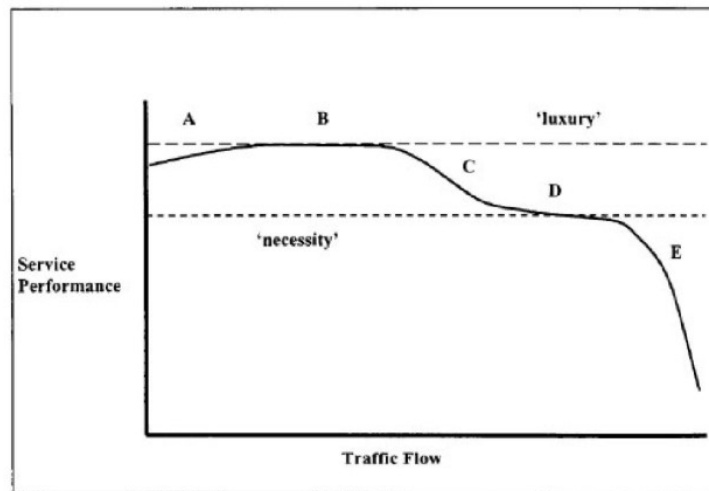


Figura 1.6: Prestazioni del Personale di Controllo al dipendere del Flusso di Traffico [34]

inesperienza dovuta ad un aeroporto sconosciuto, incrementa le possibilità di un errore umano.

I controllori di volo, d'altra parte, in condizioni di congestione si ritrovano a dover gestire una quantità considerevole di aeromobili prestando attenzione al movimento simultaneo di tutti questi e tentando di far rispettare tutte le prescrizioni previste.

Al crescere del numero di aeromobili le comunicazioni crescono in maniera più che lineare e generano un rischio di errore umano considerevole.

Tecniche di soluzione innovative comprendono l'utilizzo di una Human-Machine Interface, dove un operatore può visualizzare al contempo tutte le operazioni di volo e valutare in maniera più semplificata la quantità di dati che gli è richiesto di elaborare [44].

Assicurazioni aeree

Il danno economico derivante da collisioni ed incidenti nella fase di circolazione a terra è coperto dalle compagnie di assicurazione. Queste richiedono per la sottoscrizione della polizza un premio assicurativo dipendente dal rischio a cui le compagnie stesse si sottopongono, che dipende in primo luogo dalla quantità di rimborsi che si prevede di erogare negli anni successivi.

Di seguito sono riportate le oscillazioni dei premi assicurativi e dei costi per l'ultimo ventennio come da Airline Business Gennaio-Febbraio 2019 [21].

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Premio	1960	2100	2050	1825	1600	1650	1300	1150	1150	1325
Danni Mater.	858	1262	729	457	777	514	692	774	509	762
Resp. Civile	930	361	88	102	422	734	425	172	7	153
Resp. Minori	475	500	525	550	575	600	625	650	675	700
Costi Tot.	2263	2123	1342	1109	1774	1848	1742	1596	1191	1615

Tabella 1.1: Costi Assicurativi delle Compagnie Aeree, espressi in Milioni di Dollari USA

In linea generale, i danni possono essere così divisi:

- Hull Cost
- Liability costs
- Minor liability

In Figura 1.7 è mostrata la ripartizione assoluta e percentuale che la categoria di danno ha sulla totalità dei rimborsi generati annualmente, dal 2009 al 2018.

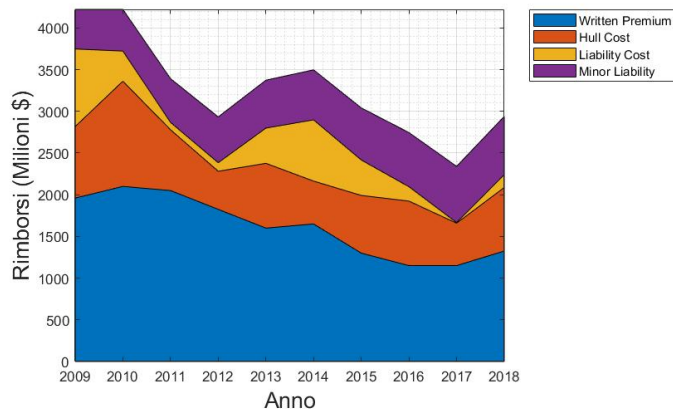
Per semplicità della trattazione gli eventi verranno divisi in base alle loro conseguenze in:

- Collisioni in taxilane, con conseguenti danni al velivolo
- Runway Incursion, con potenziali perdite di vite umane, oltre che alla perdita completa del velivolo

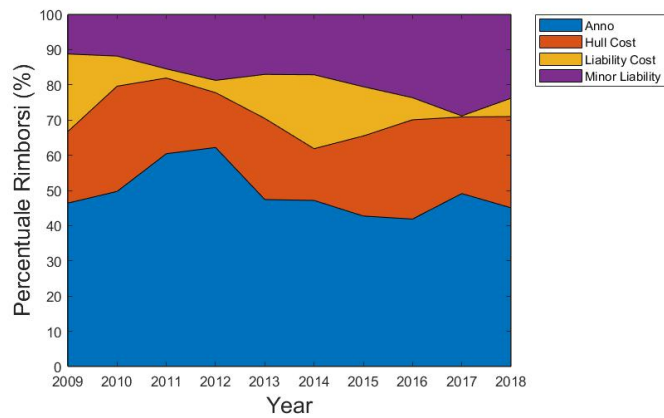
Collisioni in taxilane

I dati sulle collisioni e gli incidenti in rullaggio sono contenuti negli “Hull Costs” in Tabella 1.1. Essi rappresentano una percentuale compresa tra il 30 ed il 50% dei costi assicurativi totali. È evidente come questi sono considerati una fetta consistente dei costi dei rimborsi per le compagnie assicurative. Tuttavia, negli “Hull Costs” sono contenuti:

- Danni ad aeromobile fermo, derivanti da condizioni atmosferiche, vandalismo etc.
- Collisioni ed incidenti in fase di rullaggio



(a) Valore Rimborsi Assoluti



(b) Percentuale Rimborsi sul Totale

Figura 1.7: Rimborsi Assicurativi Annuali

- Incidenti in fase di take off
- Incidenti in fase di salita
- Incidenti in crociera
- Incidenti in fase di discesa
- Incidenti in fase di atterraggio

Di conseguenza, per una valutazione più precisa riguardante la sola fase di rullaggio, consideriamo i dati del Journal of KONES [50]. Esso riporta che, sebbene gli incidenti in rullaggio continuo solo per il 20% del

numero totale, le collisioni in fase di taxi tra due aeromobili e aeromobile-ostacolo contano rispettivamente per il 56% e per il 28% dei costi totali delle collisioni aeroportuali, stimati a 11 miliardi di dollari annui. Circa tre quarti delle collisioni in movimento sono generate dalla fase di taxi, le restanti sono imputabili alla fase di push-back.

Questi tipi di eventi si verificano principalmente in aeroporti congestionati, dovuti alle condizioni di riduzione dei distanziamenti e specialmente nelle aree di intersezione. I dati in questo senso individuano il Nord America e l'Europa come generatori di oltre il 60% delle collisioni a livello mondiale, in linea con la distribuzione mondiale dei principali movimenti aerei.

Runway Incursion

Le Runway Incursion sono da considerare come i più tragici incidenti che possano coinvolgere un aeroporto.

Esse sono provocate dalla presenza erronea di un aeromobile, veicolo o persona su una superficie destinata all'atterraggio o al decollo di aeromobili.

Sebbene siano limitate rispetto alla quantità di collisioni minori, il loro danno a livello umano e socio-economico rimane tangibile per diversi anni. Sono infatti caratterizzate dalla presenza di un aeromobile a velocità considerevole, che aumenta il rischio di eventuali perdite di vite umane.

Possono essere generalmente causate da 5 scenari[13]

- Erroneo distanziamento operato dalla torre di controllo tra due aeromobili in fase di discesa/salita. In questo modo, l'aeromobile in partenza/atterraggio tra i due si trova in una situazione dove la finestra temporale per la manovra è troppo piccola rispetto a quella richiesta per mantenere il distanziamento minimo,
- Erronea valutazione delle indicazioni di taxi per equipaggi che non sono abituati al layout dell'aeroporto, dopo esser atterrati,
- Fraintendimento con la torre di controllo per il via libera al decollo. Questo può portare ad entrare nella runway sbagliata o a non recepire bene lo stop intimato dal personale di controllo.
- Atterraggio senza il via libera
- Presenza di elementi estranei, come veicoli o persone

Sebbene siano state adottate diverse soluzioni in merito alla prevenzione di questo fenomeno, come i LRST, il RAAS o il Surface Movement Radar e

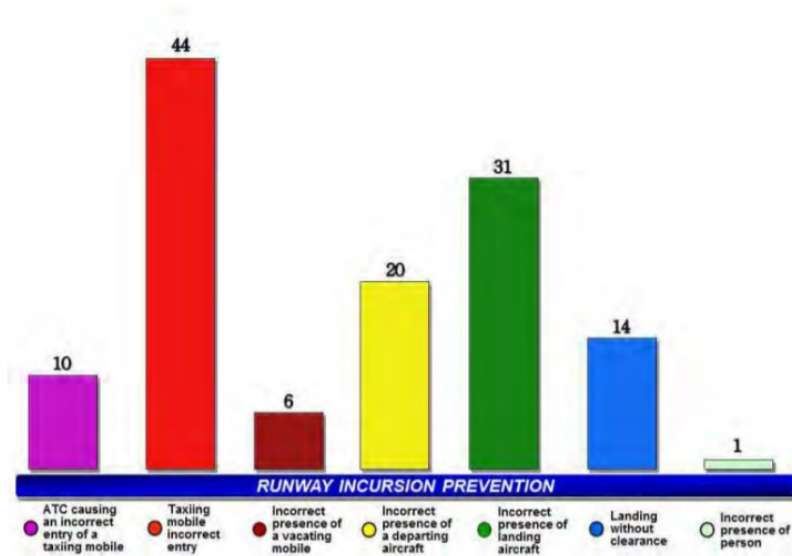


Figura 1.8: Cause principali di Runway Incursion

che l'efficienza delle barriere contro le intrusioni sia valutata al 95%, si valuta che giornalmente nello spazio aereo Europeo fino a 2 eventi al giorno. Le ragioni del verificarsi dei singoli eventi nello scenario europeo sono prevalentemente legate a problemi di comunicazione tra il personale della torre di controllo e l'equipaggio. Per un'analisi più dettagliata sulle singole cause relative a questi eventi si veda il report sull'efficacia delle barriere di protezione Runway in Europa, pubblicato dall'EUROCONTROL nel suo "Runway Incursion Incidents in Europe - Safety Functions Maps analysis" [13].

Nella trattazione del seguente capitolo è stata identificata la comunicazione terra-aereo come elemento fondamentale per l'ottimizzazione delle prestazioni aeroportuali, a seguito della descrizione del panorama normativo attuale e di un confronto con i principali sistemi di automazione disponibili nell'ambito del settore trasportistico.

Dallo studio dei parametri di consumi ed emissioni emergono i modelli disponibili che più sono adatti allo stima delle inefficienze:

- Modello di consumo istantaneo in funzione della spinta richiesta ottenuto con interpolazione lineare tramite i valori del Fuel Burn Index estratti dal Database ICAO, come in Figura 1.1
- Modello di emissione con indici di emissione lineari, come descritto al Paragrafo 1.3.2

I dati su collisioni e Runway Incursion indirizzano la trattazione verso un sistema volto a migliorare l'odierna sicurezza delle procedure di circolazione.

Capitolo 2

Le tecnologie implementate

In questo capitolo viene approfondito il panorama tecnologico, prendendo in esame l'evoluzione dei sistemi di controllo e guida della circolazione a terra. Nel primo paragrafo viene fornita una descrizione dei principali sistemi SGCM, con lo scopo di definire le prime tecnologie utilizzate per la regolazione della circolazione a terra e per meglio comprendere i principi che ne portano all'adozione.

Successivamente a questa breve introduzione, la trattazione si concentra nello studio dei sistemi A-SMGCS, evidenziandone gli elementi che hanno portato l'EUROCONTROL alla definizione delle più recenti strategie di implementazione. Vengono riportati principi, indagate le procedure di sicurezza e i principali algoritmi di ottimizzazione disponibili sul mercato.

Tramite un breve paragrafo, si indagano vantaggi e svantaggi della procedura, riportando quelli che, stando ai pareri della comunità scientifica, rappresenteranno i prossimi passi verso l'adozione di sistemi completamente automatizzati.

2.1 I sistemi SMGCS

Tutti gli aerodromi sono ora equipaggiati con i Surface Movement Guidance and Control Systems. I più comuni ad essere stati installati seguono le guide indicate nel Documento 9476 [22].

I sistemi SMGCS fungono da guida per gli aerei che atterrano o si dirigono alla Runway e per i veicoli di servizio che circolano sulle taxiway. Sono principalmente basati sul concetto “see and be seen”, dove il mantenimento del distanziamento viene garantito dalla capacità discrezionale del pilota.

Differentemente rispetto ad applicazioni più recenti, le strumentazioni SMGCS non sottraggono il ruolo di controllo all’ATC, che rimane in carica delle comunicazioni e tramite le quali guida gli aerei passo dopo passo fino al loro decollo/stazionamento. Nella loro forma più semplice questi sono formati da strisce disegnate sulla pavimentazione, luci di centre line o di delimitazione e da un sistema di stop bar ad accensione. Le prescrizioni di implementazione delle tecnologie sono riportate nel manuale SMGCS ed allegate di seguito.

Table 2-2. Guidance on selecting SMGC system aids

Aid	Traffic condition — Visibility condition —			Light			Medium			Heavy			ICAO DOCUMENT REFERENCE*
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Apron markings	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 5; <i>Aerodrome Design Manual</i> , Part 4, Chapter 2
Runway centre line marking	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 5
Taxiway centre line marking	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 5
Taxi-holding position marking	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 5
Visual aids for denoting restricted use areas	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 7
Runway edge lights	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 5; <i>Aerodrome Design Manual</i> , Part 5, Chapter 3
Taxiway edge lights	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 5; <i>Aerodrome Design Manual</i> , Part 5, Chapter 3
Obstacle lighting	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 6; <i>Aerodrome Design Manual</i> , Part 4, Chapter 14
Signs	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 5; <i>Aerodrome Design Manual</i> , Part 4, Chapter 11
Taxiway intersection marking	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 5
Charts (aerodrome, movement, apron)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 4, Chapters 13, 14 and 15
Aerodrome control service	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 11, PANS-RAC
Signalling lamp	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 5
Radiotelephony equipment	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 11, Chapter 6
Taxi-holding position lights				x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 5
Clearance bars				x	x	x				x	x	x	Annex 14, Chapter 5
Electrical monitoring system for lights				x	x		x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 8; <i>Aerodrome Design Manual</i> , Part 5, Chapter 3
Taxiway centre line lights				x			x			x		x	Annex 14, Chapter 5; <i>Aerodrome Design Manual</i> , Part 5, Chapter 3
Stop bars				x			x			x		x	Annex 14, Chapter 5; <i>Aerodrome Design Manual</i> , Part 5, Chapter 3
Selective switching capability for taxiway centre line lights							x					x	<i>Aerodrome Design Manual</i> , Part 4, Chapter 10 and Part 5, Chapter 3
Selective switching capability for apron taxiway centre line lights										x		x	<i>Aerodrome Design Manual</i> , Part 4, Chapter 10 and Part 5, Chapter 3
Surface movement radar (SMR)							x			x		x	<i>Air Traffic Services Planning Manual</i>
Aircraft stand manoeuvring guidance lights				x			x					x	Annex 14, Chapter 5
Runway clearance aid				x			x			x		x	Annex 14, Chapter 5
Secondary power supply				x			x			x		x	Annex 14, Chapter 8; <i>Aerodrome Design Manual</i> , Part 5, Chapter 2
Visual docking guidance system							x			x		x	Annex 14, Chapter 5; <i>Aerodrome Design Manual</i> , Part 4, Chapter 12

Figura 2.1: Apparecchi di sistema per Guidance

Table 2-3. Guidance on selecting SMGC system procedures

Procedure	Traffic condition — Visibility condition —			Light			Medium			Heavy			ICAO DOCUMENT REFERENCE*
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Aerodrome authority													
Periodic electrical monitoring of SMGC aids	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 8 and Chapter 3 of this manual
Designation of taxiways	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	See Chapter 3 of this manual
Movement area inspections and reporting	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 2 and Chapter 3 of this manual
Regulation of ground staff conduct on the movement area	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	See Chapter 3 of this manual
Initiation of amendment of aerodrome charts as necessary	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	See Chapter 6 of this manual
Regulation of ground staff radiotelephony procedures	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 10, PANS-RAC
Establishment of standard taxi routes				x			x			x			See Chapters 3 and 6 of this manual
Low visibility movement area protection measures				x									See Chapter 5 of this manual
Continual electrical monitoring of SMGC aids				x						x			Annex 14, Chapter 8 and Chapter 3 of this manual
ATS													
Visual monitoring of SMGC aids	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 11, Chapter 7 and Chapter 3 of this manual
Use of radiotelephony procedures and phraseology	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 10, PANS-RAC, Part 9 and the <i>Manual of Radiotelephony</i>
Use of signalling lamp	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 2, Appendix A
Control of other than aircraft traffic on the manoeuvring area	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	PANS-RAC, Part 5
Operation of lighting aids	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	PANS-RAC, Part 5
Determination of the taxiway route to be followed				x			x			x			PANS-RAC, Part 5 and Chapter 3 of this manual
Application of sequencing procedure				x			x			x			See Chapter 4 of this manual
Initiation and termination of low visibility procedures				x									PANS-RAC, Part 5 and Chapter 5 of this manual
Application of separation criteria				x									PANS-RAC, Part 5, and Chapter 4 of this manual
Continual electrical monitoring of SMGC aids				x									Annex 11, Chapter 7 and Chapter 3 of this manual
Monitoring of surface movement on SMR										x			See Chapter 4 of this manual
Selective switching of taxiway centre line lights													<i>Aerodrome Design Manual</i> , Part 4 and PANS-RAC, Part 5
Selective switching of stop bars				x			x			x			<i>Aerodrome Design Manual</i> , Part 4 and PANS-RAC, Part 5

* See Appendix A for further information on visual aids

Figura 2.2: Procedure di sistema per Guidance -a-

Table 2-3. Guidance on selecting SMGC system procedures (cont.)

Procedure	Traffic condition — Visibility condition —			Light			Medium			Heavy			ICAO DOCUMENT REFERENCE*
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Adherence to ground movement traffic rules and regulations	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 2, PANS-RAC
Use of radiotelephony procedures and phraseology	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 10, PANS-RAC and the <i>Manual of Radiotelephony</i>
Apron management													
Apron regulations and procedures	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Annex 14, Chapter 9 and Chapter 8 of this manual
Emergency procedures	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Chapters 5 and 8 of this manual
Communication procedures with ATS	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Chapters 4 and 8 of this manual
Stand allocation and information	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Chapter 8 of this manual
Apron security procedures	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Chapter 8 of this manual
Operation of lighting and docking aids				x									Chapter 8 of this manual
Provision of discrete RTF channel										x			Chapter 8 of this manual
Low visibility procedures				x									Chapter 5 of this manual

* See Appendix A for further information on visual aids

Figura 2.3: Procedure di sistema per Guidance -b-

I sistemi SMGCS sono principalmente utilizzati per la gestione di operazioni in LVC (Low Visibility Condition), ovvero quando il Runway Visual Range (RVR) è compreso tra i 400m e i 600m. Assieme ad adeguate checklists, le luci di taxi e le stop bar assistono i piloti nel completamento di queste operazioni. La presenza o meno di alcuni dispositivi dipende dalla classificazione dell'aeroporto, a sua volta dipendente dalle condizioni di traffico e dalle condizioni di visibilità.

Gli strumenti appena descritti sono funzionali ad adeguati standard di sicurezza ma non garantiscono una ottima fruizione del servizio da parte dei utilizzatori. Negli anni dunque l'ICAO ha cercato ed individuato una serie di strumenti volti al superamento della inefficienza operativa in LVC, progettati per garantire un livello di servizio ottimale anche in condizioni di visibilità ridotta.

2.2 Introduzione al sistema A-SMGCS

Il sistema A-SMGCS differisce dai sistemi SMGCS in quanto garantisce un servizio efficace in una ampia gamma di condizioni meteorologiche, densità di traffico e layout aeroportuali.

Esso segue il Manual of Advanced-Movement Guidance and Control Systems [16] ed fa uso di moderne tecnologie per garantire un elevato grado di integrazione tra le varie funzionalità dell'infrastruttura di gestione della circolazione a terra.

Il sistema A-SMGCS provvede ad informare riguardo la posizione e l'identità dei velivoli che operano nelle zone di manovra. Inoltre, provvede ad una funzione di guida e retroazione assicurando il distanziamento tra gli aeromobili, specialmente quando le condizioni visive non permettono la guida a vista.

Esso mira a ridurre la comunicazione vocale, identificare e risolvere conflitti e infrazioni, ottimizzare la circolazione e di conseguenza aumentare la capacità del sistema di circolazione a terra in ogni condizione meteo o di traffico.

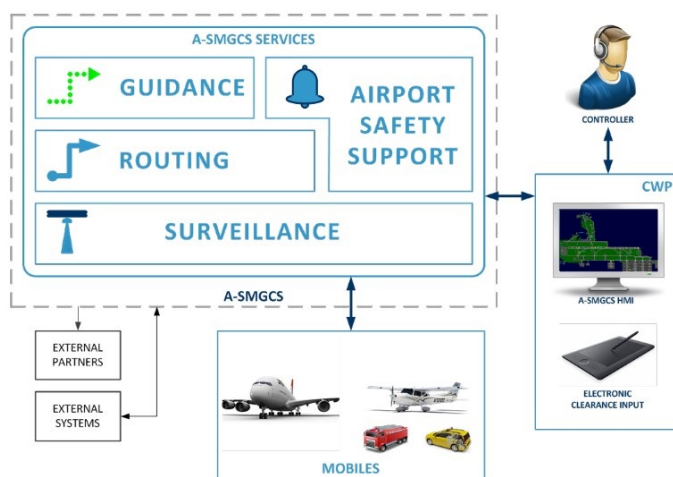


Figura 2.4: Funzionamento del sistema A-SMGCS

In breve, l'A-SMGCS dovrebbe essere capace di garantire una funzione base di sorveglianza di modo di fornire posizione, identificazione e tracciamento dei velivoli che può essere integrata con alcuni dei seguenti servizi:

- Airport safety Support Service, che provvede ad effettuare monitoraggio di sicurezza rispetto al mancato rispetto delle prescrizioni
- Routing service, per la generazione delle traiettorie

- Guidance service, che provvede indicazioni visive per la guida degli aeromobili

I differenti sistemi sono pensati per provvedere diversi livelli di funzionamento a seconda della loro interoperabilità e a seconda delle diverse combinazioni di tecnologie implementate.

Al dipendere delle necessità dell'aeroporto saranno consigliati più o meno dispositivi da implementare, nella logica del bilancio tra costi e benefici. Un approfondimento di questo aspetto è riportato al Paragrafo 3.3.

If you want to implement...You require these Services/functions							
	Surveillance	RMCA	CATC	CMAC	Routing	Automated Switching of TCL	Automated Switching of Stop Bars	Automated Activation A-VDGS
Surveillance	-							(v)
RMCA	√	-						
CATC	√		-					
CMAC	√			-	√			
Routing	√				-			
Automated Switching of TCL	√				√	-		(v)
Automated Switching of Stop Bars	√				√		-	
Automated Activation of A-VDGS	(v)							-

Figura 2.5: Tabella di implementazione tecnologie A-SMGCS

L'A-SMGCS dunque è più di un semplice set di apparecchi. Esso è progettato per:

- Nei livelli di implementazione più elementari, supportare la “situational awareness” dei controllori di volo.
- Nei livelli di implementazione più alti, disporre di reti di sicurezza, meccanismi di prevenzione e risoluzione conflitti, creazione percorsi e guida luminosa volta a ridurre e ridimensionare la comunicazione vocale in ambito aeroportuale.

2.3 Principi generali dell'Advanced Surface Movement Guidance and Control System

2.3.1 Servizio di sorveglianza

Il sistema di sorveglianza della circolazione a terra rappresenta il componente fondamentale dell'A-SMGCS e permette la successiva implementazione dei componenti di Control, Routing e Guidance. Il sistema provvede a fornire la consapevolezza della momentanea situazione di traffico al controllore di volo, il quale viene fornito di informazioni sull'identità, la posizione ed il tracciamento del velivolo rilevato.

Esso può comunicare con il Transponder, uno strumento di bordo che, sintonizzato su frequenze predisposte dalla torre di controllo, permette di identificare la posizione dell'aereo in qualsiasi momento. Il meccanismo di sorveglianza deve quindi esser dotato di uno strumento cooperativo che interagisca con il segnale a bordo. Tuttavia, nell'ottica delle procedure di sicurezza, è importante fornire il sistema anche di un dispositivo non-cooperativo, che sia in grado di identificare il velivolo indipendentemente dal funzionamento del Transponder, così da tutelare il sistema da un possibile errore.

Sebbene non sarà specificato in questa sede, il sistema di sorveglianza può essere esteso alla fase di avvicinamento per poter fornire al controllore di volo un'informazione su quali aerei sono in procinto di entrare nel sistema di circolazione a terra e dunque per prevedere al meglio le azioni future. Questo comporta una notevole semplificazione nel trattamento dei dati nelle funzioni di Routing e Guidance, tuttavia le tecnologie implementate per l'identificazione degli aerei ancora in volo sono al di fuori degli schemi tecnologici di interesse di questa tesi.

Il sistema di sorveglianza quindi fornisce una rappresentazione schematica delle informazioni di traffico al controllore di volo, potendo includere anche gli aerei in fase di avvicinamento e rappresentando tutte le informazioni su una interfaccia unica.

Questa interfaccia sarà più o meno efficiente a seconda de:

- Complessità ambiente aeroportuale
- Numero di velivoli cooperativi
- Numero di veicoli non-cooperativi

E permetterà al controllore di volo di:

- Confermare le identità dei singoli aeromobili
- Anticipare conflitti e provvedere ad una loro risoluzione anticipata
- Rilevare posizione e comportamento di eventuali veicoli non autorizzati o intrusi.

Nell'ottica dell'interoperabilità, i dati raccolti dal sistema di sorveglianza sono il principale input dei sistemi successivi, che usano le informazioni in tempo reale per svolgere le proprie funzioni.

Inoltre, i dati provenienti dal servizio di sorveglianza possono venire raccolti per analisi statistiche a posteriori e per possibili ottimizzazioni future del sistema.

Di seguito viene riportato uno schema riassuntivo di compiti e responsabilità di ogni componente del sistema di sorveglianza, come da Manuale EUROCONTROL.[16].

A-SMGCS Actors	Task / Responsibilities
Controller	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Locate and identify mobiles within the Controller's area of responsibility. ▪ Verify Flight Crew/Vehicle Driver position reports with the information displayed on the HMI. ▪ Detect intruders with the information displayed on the HMI.
Flight Crew	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Select the appropriate setting of the transponder depending on the position of the aircraft on the aerodrome.
Vehicle Driver	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Operate the vehicle transmitter in accordance with local procedures.
Others	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Use of A-SMGCS data for showing mobiles on a HMI display (e.g. Airport Operations Centre/ Airport-Collaborative Decision Making (A-CDM)). ▪ Use of A-SMGCS data for statistical analysis. ▪ Use of A-SMGCS data for accident/incident investigation. ▪ Use of A-SMGCS data for external systems (e.g. Runway Status Lights).

Figura 2.6: Principali Figure e Responsabilità del Servizio di Sorveglianza, EUROCONTROL 2018

2.3.2 Servizio di supporto di sicurezza

L'Airport Safety Support Service contribuisce alla sicurezza di tutte le operazioni effettuate in airside, analizzando i dati forniti dal sistema di sorveglianza ed:

- Anticipando eventuali conflitti

- Rilevando conflitti e intrusioni
- Rilevando i velivoli/veicoli che non hanno rispettato le prescrizioni

Deve essere in grado di gestire una quantità di aeromobili pari alla capacità massima, calcolando il distanziamento in tempo reale basandosi su velocità, grandezza velivolo, decelerazione ammessa, condizioni di visibilità, jet blast, direzione di circolazione e tempo di reazione umano.

Esso è composto di tre componenti fondamentali:

- La Runway Monitoring and Conflict Alerting (RMCA)
- Il Conflicting ATC Clearances (CATCCC)
- Il Conformance Monitoring Alerts for Controllers (CMAC)

Dove il primo è uno strumento di protezione, mentre gli altri due sono strumenti di prevenzione, che mirano a prevenire situazioni nei quali il RMCA sia azionato. La compresenza dei 3 dispositivi è dipendente dalla grandezza e dalle condizioni di traffico dell'aeroporto, in quanto l'implementazione di questi sistemi è sempre subordinata ad una logica Costi-Benefici. I diversi dispositivi si interfacciano con il controllore di volo attraverso due stage di allerta.

- L'allerta di livello 1, chiama anche Allerta di Informazione, presenta solo un segnale di potenziale pericolo, che ha lo scopo di spingere il controllore di volo a contattare il velivolo e a risolvere il potenziale conflitto rilevato.
- L'allerta di livello 2, chiamata Allerta di Allarme, si attiva solo dopo aver ricevuto un'allerta di tipo 1 e dopo che non si è disposta nessuna procedura di protezione ed indica una situazione che deve essere immediatamente risolta in quanto potenzialmente pericolosa.

Runway protected area

La maggior parte delle Allerte dei sistemi di intrusione in ambito aeroportuale sono dovute all'infrazione delle aree protette, in particolare della Runway Protected Area (RPA). I sensori rivelano un passaggio non autorizzato da una Clearance e dispongono lo stato di allerta. Se l'algoritmo è particolarmente efficiente, può prevedere una intrusione in funzione della traiettoria e delle velocità rilevate prima di infrangere i limiti RPA. I limiti di questa variano al dipendere delle condizioni di visibilità.

- In condizioni non-LVP i limiti sono definiti dall' Holding Point di categoria I
- In condizioni LVP i limiti sono definiti dagli Holding Points di categoria II e III, a seconda della RVR.



Figure 4: The RPAs Defined in Blue/Pink for Brussels Airport (EBBR)

Figura 2.7: Esempio di RPA per l'Aeroporto di Brussels

Runway monitoring and conflict alerting

L'RMCA monitora i movimenti all'interno e nelle vicinanze dell'area di Runway, allertando il controllore di volo di eventuali conflitti tra un velivolo e un qualsivoglia altro elemento circolante in pista. Può generare un'allerta di livello I o II. Esso dipende da:

- Configurazione di Runway dell'aeroporto, quindi dal layout stesso
- Posizione e tipo dei mezzi in circolazione

- Aerei in fase di approccio o elicotteri nei paraggi (richiesta la collaborazione con i sistemi di sorveglianza dei mezzi in volo)
- Condizioni meteorologiche

Conflicting ATC clearances

È un meccanismo volto a identificare se le autorizzazioni imposte dal controllore di volo siano in conflitto con la situazione reale di traffico nel momento considerato. In questo modo si effettua una verifica dell'operato del controllore che viene avvertito nel caso in cui la decisione che ha preso, se fosse seguita dal pilota dell'aeromobile, possa comportare una potenziale collisione o un'intrusione in un'area protetta.

L'azionamento di questo sistema di allerta non è dunque correlata ad infrazioni da parte del pilota o ad una situazione immediatamente pericolosa. La vulnerabilità è tangibile nel caso in cui la situazione di allerta non sia corretta. Si potrà dunque innescare un'allerta di tipo 2 con azionamento della RMCA.

Conformance monitoring alerts for controllers

CMAC fornisce uno strumento in grado di analizzare i dati provenienti dai sistemi di sorveglianza, Routing e Guidance, assieme agli orari di volo e agli input manuali del controllore, per effettuare una previsione riguardo potenziali conflitti. In questa maniera siamo in grado di prevedere se una situazione di circolazione a terra possa degenerare in un'allerta dell'RMCA, avvertendo il controllore. L'RMCA rimane sempre l'ultimo componente di protezione della RPA.

A-SMGCS Actors	Task / Responsibilities
Controller	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Detect potential conflicts between mobiles on the manoeuvring area and/or aprons. ▪ Respond to RMCA alerts on conflict situations. ▪ Respond to CATC/CMAC alerts about mobiles on the manoeuvring area and/or aprons.
Flight Crew	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Respond to Clearances from the Controller following the triggering of an alert.
Vehicle Driver	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Respond to Clearances from the Controller following the triggering of an alert.
Others	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Use of A-SMGCS data for statistical analysis. ▪ Use of A-SMGCS data for accident/incident investigation.

Figura 2.8: Principali Figure e Responsabilità del Servizio di Sicurezza

2.3.3 Servizio di Routing

Il servizio di Routing genera un percorso per ogni veicolo presente sull'aeroporto dei quali siano rilevati i parametri di posizione ed identificazione da parte del sistema di sorveglianza. È lo strumento chiave per il funzionamento degli organi di Guidance e per il funzionamento di determinati tipi di controllo preventivo, in quanto la conoscenza di percorso e velocità ci permette di stimare un'eventuale infrazione della prescrizione di arresto. Lo strumento di Routing deve consentire al controllore di volo di poter creare o modificare un percorso includendo dati di input derivanti, ad esempio, dalle procedure di Push-out o da una Alternative Parallel Taxi Routing (APTR). Si distinguono in:

- Semi-Automatici, dove l'assegnazione degli itinerari è effettuata da un controllore
- Automatici, dove l'assegnazione è effettuata da un software e il controllore di volo ha solo funzione di controllo e conseguente modifica manuale

Nel caso automatico, il sistema di Routing crea un itinerario che viene visualizzato sul pannello del controllore di volo, come in figura.

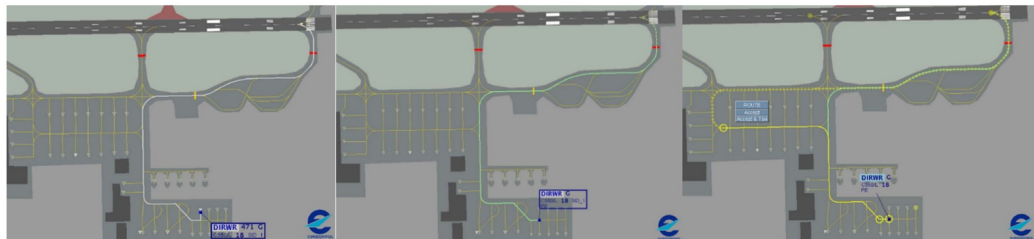


Figura 2.9: Da sinistra verso destra: Planned Route, Cleared Route, Modified Route.

Esso fornisce al controllore di volo un itinerario consigliato, che dopo Clearance del controllore diventa un itinerario autorizzato.

È rappresentato con una linea verde dove la circolazione è effettivamente permessa e con una linea tratteggiata dove la circolazione, sebbene il percorso sia autorizzato, non è permessa per la momentanea occupazione della sezione.

Il controllore di volo può sempre cambiare l'itinerario pianificato per una qualsiasi ragione.

Il manuale di Collaborative Decision Making pubblicato da EUROCONTROL [14], definisce i fattori che influenzano il tempo di taxi e come calcolare:

- Per voli in partenza, Target Take off-Time TOT
- Per voli in arrivo, Estimated In-Block Time EIBT

In relazione a questo, si rimanda al Paragrafo 2.5, dove vengono analizzate le ricerche più significative in merito agli algoritmi di Routing e Guidance.

A-SMGCS Actors	Task / Responsibilities
Controller	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verify automatically generated planned route. ▪ Modify route when necessary. ▪ Create route when needed.
Others	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Use of A-SMGCS calculated taxi times for A-CDM/DMAN. ▪ Use of A-SMGCS data for statistical analysis. ▪ Use of A-SMGCS data for accident/incident investigation.

Figura 2.10: Principali Figure e Responsabilità del Servizio di Routing

2.3.4 Servizio di Guidance

Il servizio di guida fornisce delle informazioni visive al velivolo sulla pista di volo per guidare la sua fase di taxi. Comprende questi tre fattori:

- Accensione automatica delle Taxiway Centreline Lights (TCL)
- Accensione automatica delle Stop bars
- Attivazione automatica degli Advanced-Visual Guidance Docking Systems (A-VDGS)

Al contrario di tutti gli altri meccanismi di guida, questi non si appoggiano ad un dispositivo montato sul veicolo, ma bensì sono solo ed esclusivamente montati su apparecchiature a terra. Questo aumenta la possibilità di impiego di questi dispositivi in quanto li svincola dal tipo di veicolo che percorre la pista.

Gli input del sistema vengono direttamente dalla componente di Sorveglianza e Routing, o alternativamente da input manuali del controllore di volo. Il sistema di Guidance mira a ridurre il carico di lavoro sui controllori di volo e a garantire un sistema di distanziamento anche in condizioni in cui il distanziamento visivo non sia fattibile.

Accensione automatica delle taxiway centreline lights (TCL)

L'accensione automatica delle linee di Centreline ad una particolare distanza dall'aeromobile è in grado di guidarlo in condizioni di visibilità ridotta (LVP).

Nel caso in cui la visibilità della pista lo permetta, il distanziamento viene comunque operato dal pilota, che mantiene la condizione di normale esercizio. La guida ottica può essere configurata in due modi:

- Un gruppo di luci di lunghezza predefinita che si attivano nello stesso istante
- Un gruppo di luci di lunghezza variabile. La lunghezza del segmento di guida varia a seconda della stazza dell'aeromobile, delle condizioni meteo, della velocità rilevata etc.

Questo approccio è universalmente riconosciuto come Follow the Green (FtG) ed è correntemente implementato con azionamento manuale in alcuni aeroporti europei. A livello grafico, il controllore di volo visualizza sulla sua interfaccia la sequenza di luci che sono attive sul Centreline, di modo da poter avere sempre sotto controllo la situazione.

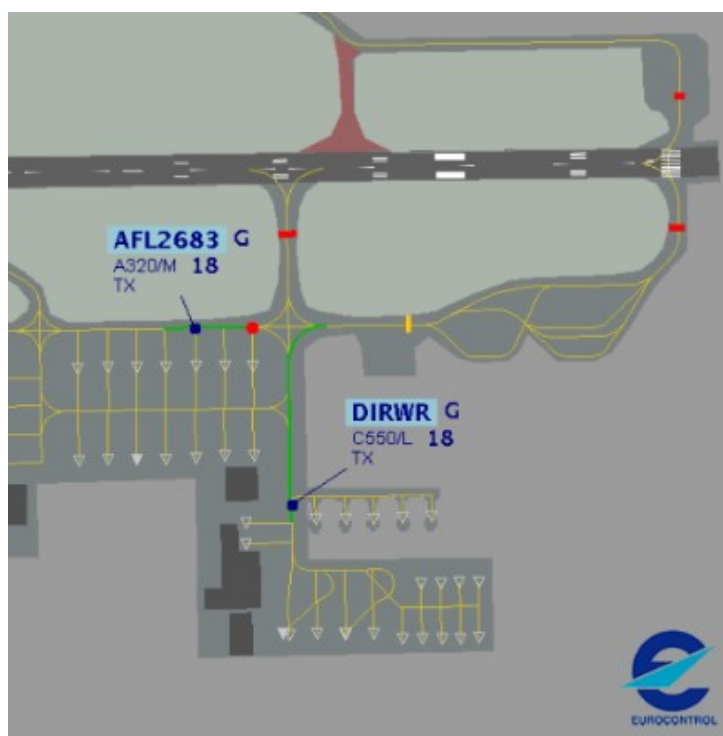


Figura 2.11: Accensione del Centreline

L'accensione delle stop bar è segnalata da un punto o una barra rossa.

Accensione automatica delle stopbars

Le stop bar automatiche possono essere situate in corrispondenza dei diversi punti attesa al dipendere delle condizioni di visibilità rilevate (per proteggere la RPA) o in vicinanza di punti di conflitto di taxiway. In quest'ultimo caso, la funzione della Stop Bar è quella di veicolare il messaggio da parte del controllore di volo di dare precedenza al velivolo sopraggiungente nell'altra direzione.

Accensione automatica degli advanced-visual docking Guidance systems (A-VDGS)

I sistemi A-VDGS sono utilizzati per assistere alle procedure di parcheggio o di Push-Back per i velivoli, in quanto, tramite uno schermo situato in piazzola di sosta, trasmettono un'informazione senza comunicazione radio.

A-SMGCS Actors	Task / Responsibilities
Controller	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Provide the Clearance to the Flight Crew or Vehicle Driver via R/T and make an electronic Clearance input. ▪ Monitor all movements under their responsibility. ▪ If or when it is required change priority of Airfield Ground Lighting (AGL) switching to ensure correct taxi sequence is maintained.
Flight Crew	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Taxi aircraft in accordance to the cleared route as indicated by the Guidance Service.
Vehicle Driver	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Drive Vehicle in accordance with the cleared route as indicated by the Guidance Service.
Others	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Use of A-SMGCS data for statistical analysis. ▪ Use of A-SMGCS data for accident/incident investigation.

Figura 2.12: Principali Figure e Responsabilità del Servizio di Guidance

2.4 Hardware e software

L'ecosistema del mercato delle tecnologie A-SMGCS comprende:

- Fornitori di materiali grezzi
- Produttori di componenti ed equipaggiamenti A-SMGCS
- Sviluppatori degli impianti di simulazione e software A-SMGCS
- Fornitori di servizi per la navigazione aerea
- Distributori
- Operatori aeroportuali
- Autorità dell'aviazione civile
- Autorità regolatrice
- Consumatori finali

Al momento, i principali player nel panorama A-SMGCS mondiale includono il gruppo SAAB (Svezia), Indra Sistemas (Spagna), Thales Group (Francia), ATRiCS (Germania), e ADB Safegate (Belgio).

L'offerta tecnologica delle suddette compagnie si distingue per piccoli particolari di implementazione ma può essere raccolta nel seguente elenco, dove le tecnologie sono divise per la parte Software e Hardware.

1. Hardware

- Radar
- Sistemi di luci di terra
- Sistemi di tracciamento dei veicoli (Transponder S)
- Visual Docking Guidance Systems, trattati al Paragrafo 5.2.1
- MLAT/WAM
- ADS-B Stazione di Terra, per il tracciamento dei Transponder S
- HMI/CWP (Human Machine Interface, Controller Working Position)

2. Software

- Algoritmi di logica conflitti

- Mappe in tempo reale della superficie aeroportuale (2D/3D)
- Sistemi di allerta video e audio

Ognuna di queste tecnologie assolve ad una funzione caratteristica dell'ambiente A-SMGCS, dalla procedura di sorveglianza fino a quella di Guidance descritte al Paragrafo 2.3. Di seguito vengono riportate le tecnologie principali di localizzazione, che si pongono come alternativa al concetto di SMR (Surface Movement Radar), abbondantemente impiegato in ambito aeroportuale ma legato alla discontinuità del segnale e soggetto a zone di buio specialmente se tra l'oggetto emittente e il ricevitore è posizionata una struttura.

Le restanti tecnologie, consolidate da più di un decennio e che possono contare su una comprovata affidabilità e performance, verranno analizzate in seguito con riferimento alla configurazione del sistema stesso.

Transponder S e ADS-B

Il Mode S è una tecnologia di trasmissione dati utilizzata dal radar secondario di sorveglianza (SSR) per il controllo del traffico aereo dei velivoli dotati di transponder.

Rispetto ai Transponder Mode "A" o "C" il transponder "S" indica la possibilità di interrogare il velivolo in maniera selettiva tramite un indirizzo univoco a 24 bit.

ADS-B, sigla di Automatic Dependent Surveillance - Broadcast, è una tecnica cooperativa di controllo del traffico aereo (ATC) particolarmente utile per l'identificazione degli aeromobili e dei veicoli sul sedime aeroportuale nell'ottica della gestione del traffico in aeroporto e per evitare eventuali collisioni in mancanza di visibilità o congestione del traffico.

Un aeromobile o veicolo dotato di un transponder Modo S, se collegato ad un dispositivo GPS, è in grado di calcolare la propria posizione e di inviarla periodicamente nell'etere in modo che speciali ricevitori di tipologia ADS-B siano in grado di identificare la posizione del target trasmittente. Le informazioni di posizione del target sono presenti in messaggi di tipo Mode S extended. Il messaggio trasmesso dal target è di tipo broadcast, in quanto il trasmettitore non è interessato a chi riceve il messaggio. La tecnologia è automatica in quanto il messaggio contenente le informazioni per la localizzazione del target viene spedito periodicamente senza l'intervento diretto di operatori né necessariamente è sollecitato dall'esterno.

MLAT/WAM

Il sistema MLAT consiste in una rete di stazioni riceventi e trasmettenti che, all'interno di un aeroporto e tra una stazione trasmittente ed un ricevente in pista, correla i segnali di risposta a determinate interrogazioni ed è in capacità di calcolare la posizione dei velivoli.

Non essendo una componente rotante, al contrario dei tradizionali radar, riceve permanentemente i dati e di conseguenza l'aggiornamento delle informazioni risulta essere notevolmente più veloce che nel caso di un radar tradizionale.

Il sistema WAM è concettualmente simile al sistema MLAT, per operatività e ed elaborazione dati. Il vantaggio principale sta nella particolare configurazione della tecnologia che si focalizza su un costo di manutenzione minimo e un'architettura scalabile e flessibile, per un'implementazione che sia in grado di coprire tutte le esigenze aeroportuali.

2.5 Algoritmi di routing

Successivamente alla descrizione delle funzioni principali e dei componenti più rilevanti per la costituzione dei meccanismi A-SMGCS, si analizzano di seguito i principali passi che la ricerca nel campo dei software di routing ha portato a termine negli ultimi 20 anni. Infatti, questa tecnologia ha affrontato un rapido progresso nelle ultime due decadi, seguendo il trend generale di adozione delle tecnologie di automazione nell'ambito del management del traffico aereo.

Nei primi anni 2000, alcuni dei principali aeroporti internazionali, supportati dai relativi normatori nazionali, hanno cominciato a considerare l'adozione del processo di gestione a 4 fasi descritto ai Paragrafi precedenti per la procedura A-SMGCS.

Il centro aereo tedesco successivamente agli studi riportati da Klein [30] nei primi anni 2000 ha inizializzato un progetto che ha portato alla simulazione di un complesso A-SMGCS per valutarne la possibilità di implementazione. Assieme al rischio crescente comportato dall'incremento del carico di lavoro dei controllori di volo, Stoica et al. [46] diedero il loro contributo sviluppando uno dei primi approcci matematici alla procedura di Routing, minimizzando il ritardo sulla base di algoritmi costruiti tramite teoria dei grafi e ricerca del percorso più corto.

Sfortunatamente, anche come conseguenza dello stato di impreparazione delle tecnologie, la diffusione della tecnologia A-SMGCS ha subito uno stop, per essere poi ripresa dagli studi di Roland e Visser [37], che nel 2008 modellarono i percorsi a terra tramite un modello lineare.

Da allora, i successivi anni di ricerca riguardo gli A-SMGCS si concentrarono prevalentemente attorno alla creazione di algoritmi di gestione del traffico a terra che ottimizzassero la fase di Routing, sfruttando tecnologie di sorveglianza già mature.

Xinmin [53], supportato da nuove tecnologie di programmazione, modellò un algoritmo basato sull'adozione delle Petri Nets. Dal 2010 le attività di ricerca si sono mosse velocemente, per provvedere alla progettazione di uno strumento affidabile ed efficiente per risolvere la necessità crescente di ottimizzazione dei movimenti aeroportuali a terra.

Atkin e Ravizza [4], si lanciarono su approcci euristici ottenendo risultati più incoraggianti analizzando gli storici di decolli e atterraggi. Tramite il Quickest Path Problem with Time Windows (QPPTW) algorithm analizzarono la possibilità di ridurre i tempi di attesa ritardando l'accensione dei motori aspettando che la configurazione di traffico sulle taxiway permettesse

di minimizzare i consumi mantenendo inalterato l'orario di partenza. Claire e Richards [8] utilizzarono un algoritmo Receding Horizon, che ha come principale difetto quello di considerare un tempo di taxi medio su cui è basato il sistema di determinazione del percorso. Rispetto però all'algoritmo FCFS (First Come First Served) che è lo stesso applicato da un controllore umano, si hanno miglioramenti fino al 50% del tempo di taxi, considerando percorsi alternativi a quelli di minima lunghezza. Sebbene si sottolineò un cambiamento considerevole, l'algoritmo non considerava un cambio di percorso durante la fase di taxi, ovvero non considerava il re-Routing.

Tang [48] creò una simulazione di un sistema 3D di circolazione aeroportuale basato sui dati ottenuti tramite il software Flight Gear Simulator, tentando di riflettere il più possibile le reali performance degli aereomobili.

Zhu et al. [57] propose un'estensione nell'applicazione delle Hybrid Petri Nets per risolvere anche le intersezioni e le precedenzae per gli aeromobili in taxi. Utilizzando luci di Guidance installate al suolo, si cominciò a considerare la possibilità di implementare la tecnologia FtG (Follow the Green).

Jiang [27] stabilì un modello di ottimizzazione degli orari di partenza introducendo il concetto di priorità degli aeromobili all'interno del modello, evitando i potenziali conflitti rilevati modificando opportunamente la velocità di taxi e i tempi di attesa alle intersezioni.

Bakowski [5] migliorò ancora la precisione dei precedenti modelli andando a modificare la velocità del taxiing con un algoritmo RTA (required Time of Arrival). Maggiore è il ritardo rispetto all'arrivo a destinazione e maggiore è la velocità di taxiing, di modo da ottimizzare i ritardi totali.

Alcuni autori provarono a seguire un approccio leggermente differente per aumentare le performance del sistema A-SMGS. Zafar [55] considerò un'integrazione tra gestione del gate e delle piazzole di sosta per migliorare la gestione dei flussi e fornire un adeguato supporto al decision making, mentre Mirković [33] propose un innovativo concetto di rotonda aeroportuale per la risoluzione dei conflitti di intersezione.

Di particolare interesse per lo sviluppo di questa tesi è il lavoro di Marchionni [32], che propose per l'aeroporto di Linate un sistema di gestione automatica delle taxiway parallele alle piste di volo, fondato sulla tecnologia di controllo a blocchi tipica del sistema ferroviario.

Sulla scia del loro lavoro, [49] Teutsch e Postma-Kurlanc proposero un sistema di Routing e Guidance a blocchi virtuali, con circolazione regolata da semafori, estesa alla circolazione nei pressi dell'aerostazione ma ancora priva

di un sistema realmente integrato.

Roudet [38], raccogliendo tutte le considerazioni e i progressi precedenti, tentò il primo approccio combinato dei diversi componenti del sistema A-SMGCS, sviluppando un approccio iterativo che utilizzava input in tempo reale per supportare il sistema di sicurezza aeroportuale.

Jiang [28] incluse nel suo modello il ritardo delle procedure di push-back e il percorso di taxiway come variabili decisionali, mantenendo l'ottimizzazione del tempo totale di taxiway aggiungendo l'influenza delle procedure di apron.

Tang [47] progettò il shortest path planning Multi Agent System (MAS) che non era solo in grado di calcolare il percorso di minor distanza percorsa, ma visualizzava in un'interfaccia, introducendo il concetto di Human Machine Interface, il processo di creazione del percorso.

L'importanza della visualizzazione fu in seguito indagata dal lavoro di Argyle [3], che portò avanti una ricerca per valutare la capacità del controllore umano di sopportare i carichi di lavoro tipici del traffico aereo. Questo lavoro fu fondamentale per definire i parametri di progettazione del sistema in relazione all'utilizzatore finale, sottolineando l'importanza dell'interazione tra uomo e macchina, e considerando gli ATCOs come parte integrante del processo nel suo complesso.

In parallelo, il lavoro condotto negli ultimi 5 anni da alcuni autori si è proposto di concentrare l'attenzione su tematiche di protezione ambientale. Weiszer [51] implementò un'applicazione dell'AR in tempo reale per minimizzare il tempo di taxiway e il consumo di carburante di un aereo in rullaggio, concentrandosi sulla velocità di computazione dell'algoritmo.

Chen [7] presentò un nuovo approccio, cosiddetto di Active Routing, che provvedeva alla definizione di un movimento a terra affidabile, economico ma soprattutto sostenibile. Zhang [56] propose un meccanismo di ottimizzazione multi-obiettivo che considerasse obiettivi contrastanti come le emissioni di alcuni tipi di inquinanti.

Per concludere, il lavoro di Dabachine [10], si focalizzò su nuovi approcci che non solo rilevino e risolvano conflitti, ma che siano anche in grado di prevederli in una fase preliminare di creazione del percorso.

Considerando l'applicazione della procedura A-SMGCS all'aeroporto di Milano Malpensa, come si vedrà in seguito, non verrà considerata la tematica dell'ottimizzazione del percorso sotto l'assunzione che la varietà delle taxiway percorribili non sia sufficientemente ampia da permettere una scelta. Al contrario, sarà sviluppato, anche alla luce delle esigenze dell'aeroporto, un

algoritmo di ottimizzazione delle velocità per ridurre consumi ed inquinamento.

Vale la pena sottolineare che la maggior parte delle ricerche citate non sono attualmente presenti sul mercato con un prodotto finito. Sarà dunque ripreso il lavoro di Marchionni, presentando un sistema di circolazione a blocchi, alla luce della sua fattibilità tecnica immediata e della relativa economicità delle tecnologie adottate.

Il lavoro di tesi si propone dunque di affinare il concetto di sezioni di blocco in ambito aeroportuale in quanto, per considerazioni che verranno fornite in seguito, risulta più affine alle necessità dell'aeroporto di Milano Malpensa. Vengono definite caratteristiche geometriche, condizioni di funzionamento e principi di sicurezza e viene fornito uno strumento di Active Routing di modo da regolare in tempo reale la velocità dei velivoli. Lo schema si propone inoltre di fornire uno strumento di supporto alle decisioni per mezzo del concetto di Human-Machine Interface, così come un'affidabile strumento di raccolta dati.

2.6 Vantaggi della comunicazione nel sistema A-SMGCS

A valle della trattazione tecnologica vale la pena evidenziare vantaggi e criticità delle tecnologie appena descritte. Il principale vantaggio di un sistema A-SMGCS rispetto ai sistemi tradizionali risiede nella possibilità di implementare questo tipo di tecnologia affidandosi solo ed esclusivamente ad una infrastruttura a terra, tralasciando eventuali installazioni a bordo del velivolo. Questo favorisce la velocità di implementazione della tecnologia, facilita la fase di collaudo e contiene i costi.

Mantenendo inoltre un grado di interoperabilità limitato al singolo aeroporto, non ha bisogno di tecnologie in grado di comunicare con apparecchi provenienti da tutto il mondo. Essendo le indicazioni luminose trasmesse in linguaggio univoco per qualsiasi compagnia aerea, è applicabile per qualsiasi tipo di velivolo, indipendentemente dallo stato tecnologico delle attrezzature di bordo.

Inoltre, come abbondantemente descritto in precedenza, la velocità delle operazioni favorisce capacità e sicurezza, portando a minori ritardi, minori consumi ed emissioni.

L'indipendenza dalla verifica visiva garantisce operabilità in tutte le condizioni di visibilità.

2.6.1 A-SMGCS: cosa manca

Al momento, il sistema A-SMGCS si basa completamente su una serie di sistemi installati sull'infrastruttura, lasciando al pilota la necessità di interpretare le prescrizioni e rispettarle. Un sistema del genere non è sottoposto a nessuna retroazione automatica sull'effettivo rispetto delle prescrizioni da parte del personale di volo. L'infrazione di una prescrizione viene così rilevata dal sistema, ma la degradazione della marcia è comunque subordinata all'operato del controllore di volo e del pilota, secondo il seguente schema:

- Avviene una infrazione
- I sistemi di prevenzione e rilevazione delle infrazioni vengono attivati e avvisano il controllore
- Il controllore sulla sua interfaccia analizza il segnale ricevuto
- Il controllore chiama il pilota per notificargli una prescrizione

- Il pilota rivede la sua decisione

Sviluppi futuri di questa tecnologia considereranno l'adozione di strumenti a bordo che siano in grado di interpretare i messaggi A-SMGCS, rilevando ed eventualmente intervenendo automaticamente sul comportamento tenuto dal pilota.

In questo capitolo, a seguito di un'analisi della struttura di un sistema A-SMGCS sono emerse le caratteristiche fondamentali da implementare all'interno del sistema oggetto di questa tesi:

- Sorveglianza, definendo la necessità di una ridondanza di informazioni di posizionamento e velocità:
 1. sul veicolo (i.e. Transponder S)
 2. sull'infrastruttura (i.e. Radar)
- Controllo, progettando un sistema che rispetti le funzioni di:
 1. RMCA
 2. CATCC
 3. CMAC Come descritto al Paragrafo 2.3.2
- Routing, identificando il sistema di circolazione a blocchi come oggetto di questa tesi, per delle motivazioni che saranno fornite in seguito, e presentando il meccanismo di Active Routing
- Guidance, individuando le tecnologie più vantaggiose per la prescrizione delle informazioni di volo:
 1. Accensione automatica delle Stop Bars
 2. Procedura Follow the Greens

Capitolo 3

La capacità di un aeroporto

Una volta aver descritto nel dettaglio il panorama normativo e le principali tecnologie adottate vengono evidenziati i principali aspetti che concorrono alla definizione della capacità totale.

La comprensione del movimento dei flussi di traffico in un aeroporto permette di identificare ed risolvere le principali problematiche dovute ad un deterioramento della capacità operativa, sfruttando le possibilità di adozione delle tecnologie descritte finora.

L'interesse principale per la trattazione di questo capitolo è rivolto alla comprensione delle variabili fondamentali che concorrono alla valutazione della capacità dei sistemi di circolazione a terra, nell'ottica di un design di sistema che consideri in maniera esaustiva tutte le esigenze aeroportuali.

Vengono quindi descritti i principali passi nella procedura di progettazione di un sistema A-SMGCS, con lo scopo di supportare la configurazione del lavoro di questa tesi nella successiva parte più applicativa.

3.1 La capacità totale

La capacità totale di un aeroporto si esprime tramite il numero di aeromobili che possono completare le operazioni di decollo e atterraggio sulla pista e può essere calcolata in movimenti/h. È definita da EUROCONTROL come il minimo tra le seguenti capacità (Avisu, 2016):

- Capacità Landside, con parcheggi, controlli di sicurezza, strade di adduzione, aree di scambio, check-in, security, controlli di confine, smistamento bagagli
- Capacità servizi di handling, scarico bagagli, rifornimento ecc ecc
- Capacità della Circolazione a terra, gestione dei gate, taxi, e Runway
- Capacità dello spazio aereo
- Caratteristiche tecniche velivoli

La coesistenza di diversi elementi che concorrono alla definizione della capacità rende quindi cruciale comprendere l'influenza che ogni singolo settore ha nell'economia dell'aeroporto, per eventualmente andare a comprendere l'entità del beneficio che è possibile trarre da una sua ottimizzazione. Le previsioni di capacità, nonostante si attestino al +17% entro il 2035, stimano un numero potenziale di oltre 1.9 milioni di voli non soddisfatti, che lasceranno alle altre alternative modali un potenziale mercato da 120 Milioni di passeggeri l'anno. [19]

Stando al manuale EUROCONTROL le indicazioni di capacità sono principalmente utili per individuare quale dei settori dell'aeroporto presentano una capacità minore e dunque fungono da "collo di bottiglia" per l'ottimizzazione dell'infrastruttura. Disponendo allora di un modello di riproduzione della capacità si possono dunque stimare i diversi impatti portati dalle singole misure.

Nella pratica professionale si calcolano 3 tipi di capacità che hanno gradi di precisione e funzioni diverse nel processo decisionale, utilizzando in maniera più o meno congiunta i metodi descritti in precedenza:

- Structural airside capacity, utilizzata per pianificazione strategica e dunque priva di dettagli operativi relativi alle singole giornate, fornisce una stima di massima per le operazioni da perseguire negli anni successivi. Non considera variabili come il meteo, che sono imprevedibili sul lungo periodo.

- Planned airside capacity, utilizzata per la pianificazione stagionale dell'aeroporto e correlata ad analisi meteorologiche di lungo corso, per determinare l'allocazione stagionale delle risorse aeroportuali, i processi di coordinamento e il network management.
- Operational capacity, utilizzata per la pianificazione giornaliera dell'aeroporto. In maniera dettagliata si prende atto delle singole variabili meteorologiche, di manutenzione e in generale di tutti i più minuti fattori di influenza di modo da ottimizzare a livello giornaliero l'utilizzo dell'infrastruttura nel suo complesso.

3.1.1 Determinazione della capacità totale

Sebbene la capacità aeroportuale sia la chiave per la determinazione della portata e di conseguenza una diretta valutazione degli introiti delle società aeroportuali e delle aerolinee, non è presente una metodologia accettata universalmente per la sua determinazione.

In genere, la determinazione della capacità in un aeroporto è un processo dispendioso e diverso da località a località, che necessita di lunghe analisi e specifiche competenze e che viene azionato da due principali indicatori:

- Se la domanda attuale genera ritardi in qualsivoglia condizione meteo, se la domanda futura è previsto che possa causare simili problemi,
- Se fosse previsto un inasprimento delle norme sulla circolazione aeroportuale.

Ed ha lo scopo di prevedere il ritardo sulla base delle sollecitazioni di traffico in entrata nel sistema.

I metodi per il calcolo della capacità sono i seguenti:

- Analisi dello storico dei dati di portata aeroportuale
- FAA (Federal Aviation Administration) Advisory Circular
- Modelli di simulazione

Analisi dello storico aeroportuale

I dati di portata possono essere considerati come il metodo più veloce ed intuitivo per avere una stima della capacità all'istante considerato. Anche se è un metodo reattivo, che traccia l'andamento della portata al variare delle misure adottate non conoscendo nel dettaglio i processi interni ad ogni

sistema, propone una misura pragmatica della capacità e aiuta a identificare i settori aeroportuali su cui andare ad effettuare uno studio più approfondito. Per evidenziare in maniera più effettiva le correlazioni con le singole variabili, i dati di portata devono essere raccolti in maniera più disaggregata possibile, considerando ad esempio condizioni meteo, spazio aereo, Runway, Taxiways, Gates, staff, in modo da evidenziare tutte le possibili influenze.

FAA Advisory Circular

L'FAA nella sua Advisory Circular AC 150/5060-5 [20] dispone di un ampio set di tabelle e calcoli svolti per una valutazione della capacità basata sugli input di sistema. Al contrario dell'analisi dello storico aeroportuale si determina attivamente la capacità di ogni singolo sistema all'interno dell'aeroporto tramite la valutazione di indici riferiti al traffico reale. Tuttavia, il modello si basa sulle seguenti assunzioni, limitative rispetto alla complessità aeroportuale descritta in precedenza:

- La Runway può essere utilizzata solo in una delle 19 configurazioni riportate sull'Advisory Circular
- Gli arrivi sono ipotizzati uguali alle partenze
- La percentuale di movimenti Touch & Go è limitata al 50% dei movimenti
- Le Taxiway sono modellate come percorsi paralleli alla Runway, si ha disponibilità di ampie uscite ed entrate in pista
- Mancanza di limitazioni dello spazio aereo
- Almeno una pista ILS

Il principale fattore che concorre alla determinazione della portata è il Mix Index, determinato con la tabella in Figura 3.1, al dipendere della percentuale di aerei di tipo C e D che completano movimenti di decollo o atterraggio e dei movimenti di Touch & Go ed la percentuale di aerei a fusoliera larga (doppio corridoio) che sono serviti dai servizi al Gate.

Una volta determinato il Mix Index a seconda della configurazione di Runway possiamo calcolare 3 diverse capacità:

- Capacità Runway
- Capacità Taxiway

Mix Index %(C+3D)	Percent Arrivals	Percent Touch & Go
0-20	50	0-50
21-50	•	0-40
51-80		0-20
81-120	•	0
121-180	•	0

Figura 3.1: Tabella per la determinazione del Mix Index [20]

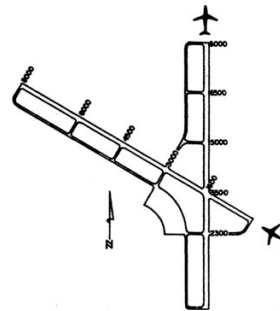
- Capacità Gate Operations

Vengono riportate in Figura 3.1, 3.2 e 3.3 le tabelle per la determinazione della capacità dei 3 diversi componenti, avvalendosi degli esempi riportati nell'appendice 2 dell'Advisory Circular.

In Figura 3.4 è riportato un esempio dell'influenza degli attraversamenti taxiway. In Figura 3.5 viene riportata la tabella per la definizione della capacità oraria dei gate.

Finalmente, possiamo definire la capacità come il minimo delle 3, secondo lo schema in Figura 3.6.

Dove il fattore più limitante è in genere individuato dai gate. In relazione al processo appena descritto, nel quale si è volutamente tralasciata la trattazione sui singoli indici per semplicità, ci si limita a considerare che la quantità di variabili in gioco è pesantemente insufficiente in relazione ai moderni sistemi di gestione aeroportuale. Considerando le diverse dipendenze espresse al 3.1.1 è chiara la mancanza di aspetti fondamentali come l'influenza della circolazione a terra in tutta la sua complessità. Nell'Advisory Circular, essa viene tenuta in considerazione solo come elemento limitante dal punto di attraversamento Runway. Inoltre, esso non include i più moderni sistemi di comunicazione aeroportuali e di controllo torre, come l'A-SMGCS, obiettivo principale dello sviluppo di questa tesi. Le tabelle dell'FAA sono dunque utili per una stima di massima del traffico aeroportuale ma mostrano i loro limiti nel momento in cui si volesse valutare l'adozione di tecnologie per l'ottimizzazione dei processi esistenti. Risulta dunque necessario l'utilizzo di modelli di simulazione che ci danno la possibilità di includere molti più parametri



(a)

RUNWAY-USE DIAGRAM	DIAG. No.	RUNWAY INTERSECTION DISTANCE IN FEET		FIGURE No.			
		(x)	(y)	FOR CAPACITY		FOR DELAY	
				VFR	IFR	VFR	IFR
	43	0 TO 1999	- 4000	3-27	3-59	3-85	3-91
	44	2000 TO 4999	- 4000	3-28	3-60	3-86	3-99
	45	5000 TO 8000	- 4000	3-29	3-61	3-86	3-99
	46	0 TO 1999	+ 4000	3-30	3-62	3-86	3-99
	47	2000 TO 4999	+ 4000	3-31	3-63	3-71	3-102
	48	5000 TO 8000	+ 4000	3-32	3-64	3-71	3-102

(b)

Figura 3.2: Schema Runway (a) e Tabella Associata (b)[20]

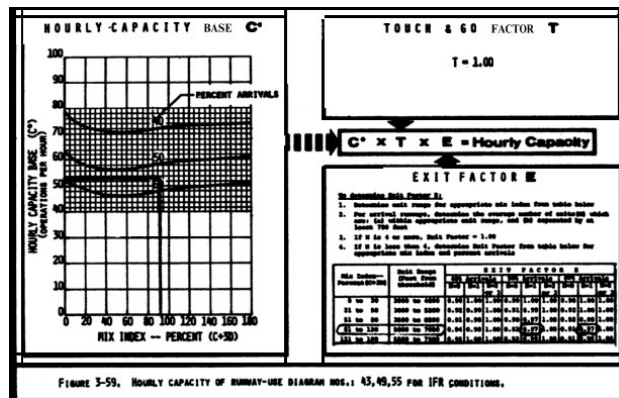
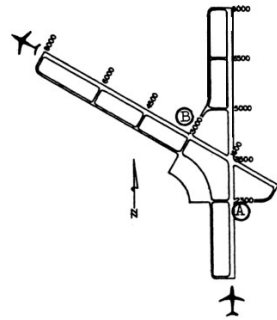
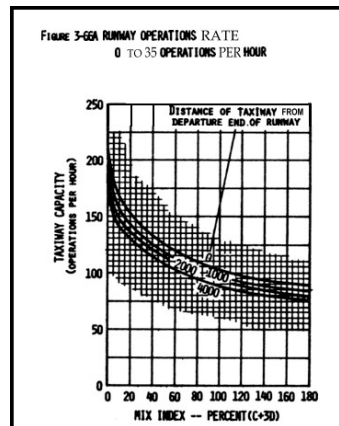


Figura 3.3: Tabella per la determinazione della capacità Runway in IFR [20]

e di conseguenza di formulare un modello di capacità molto più fedele alle situazioni reali.



(a) First figure



(b) Second figure

Figura 3.4: Esempio di Runway con attraversamenti Taxiway A e B (a) e relativa Tabella (b) [20]

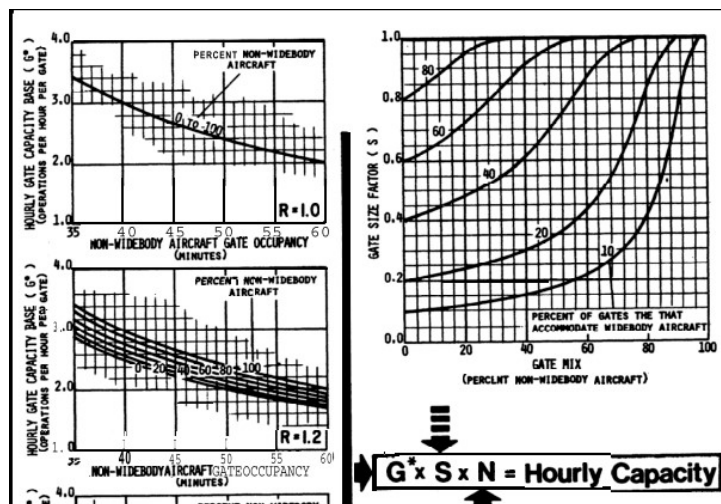


Figura 3.5: Esempio di Tabella per la determinazione della capacità dei gate. N è il numero dei gate. [20]

Modelli di simulazione

I modelli di simulazione risultano uno strumento flessibile, moderno ed efficiente per la stima della capacità. Al contrario dei precedenti metodi, hanno comunque bisogno di competenze avanzate di modellizzazione informatica e di un certo tempo per essere sviluppati, ma compensano questi difetti con delle stime utili ed accurate. La loro versatilità di utilizzo e velocità di adattamento ai cambiamenti giornalieri dovuti ad agenti esterni li rende modificabili

Component	Hourly Capacity	Hourly Demand	Demand Ratio	Component Quotient
			Component Demand	Component Capacity
			Runway Demand	Demand Ratio
Runway	89	50	$50/50 = 1.00$	$89/1.00 = 89$
Twy Xing A	107	20	$20/50 = .40$	$107/.40 = 267$
Twy Xing B	125	24	$24/50 = .48$	$125/.48 = 260$
Gates	29	27	$27/50 = .54$	$29/.54 = 54$

Figura 3.6: Determinazione della capacità oraria dell'aeroporto [20]

nel tempo e di conseguenza permette di ammortizzare l'investimento per il loro sviluppo.

Rispetto ai dati storici, siamo in grado di simulare scenari complessi che non sono correlati con la moderna configurazione aeroportuale, come ad esempio la costruzione di una nuova Runway e gli effetti sulla circolazione a terra. I dati sugli storici aeroportuali, basandosi sulla correlazione tra gli scenari passati e quelli previsti senza conoscere i processi alla base dei fenomeni da lui utilizzati, sono più imprecisi nel valutare situazioni dove i cambiamenti siano significativi.

Rispetto invece alle indicazioni dell'Advisory Circular AC 150/5060-5, dispongono di una varietà maggiore di variabili e una volta programmati sono dotati di elevate velocità nella valutazione di scenari differenti, ottenuti cambiando i parametri di ingresso del sistema, senza il bisogno di calcoli aggiuntivi.

3.2 La capacità dei sistemi di circolazione a terra

3.2.1 La circolazione a terra nel panorama aeroportuale

Riprendendo la definizione di circolazione a terra, essa è temporalmente determinata da:

- La fine delle operazioni logistiche a terra e la disponibilità della pista di volo. (Per le operazioni di decollo, nel caso in cui l'aereo stia effettuando un taxi-out)
- Dalle tempistiche di atterraggio e la disponibilità della piazzola di sosta. (Per un movimento taxi-in)

Di conseguenza, gli ingressi, ovvero le sollecitazioni di traffico di questo sistema sono determinate univocamente dalle relazioni con i sistemi di gestione aeroportuali precedenti e successivi (3.7). La capacità aeroportuale totale ne viene inficiata nel caso in cui il sistema di movimenti di superficie non sia in grado di gestire la quantità degli aeromobili in arrivo dai due settori, dando vita al collo di bottiglia menzionato al 3.1.1

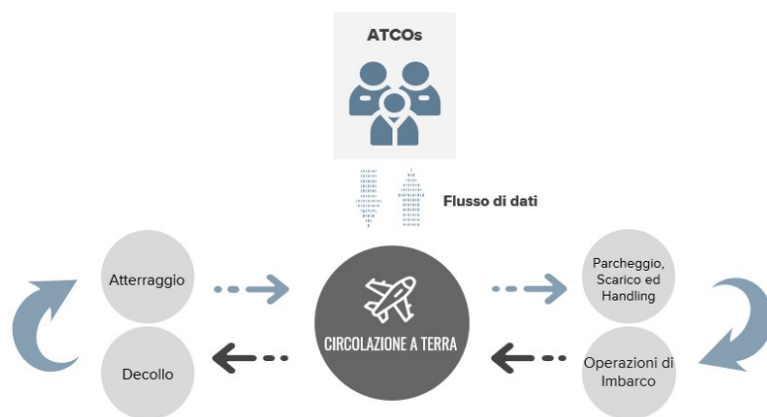


Figura 3.7: Sistema di Dipendenze della Circolazione a Terra

Quando infatti la sollecitazione di traffico degli impianti di circolazione a terra si avvicina a situazioni di capacità limite, la congestione genera la serie di inefficienze studiate al Paragrafo 1.3.

3.2.2 Determinazione della capacità per i sistemi di circolazione a Terra

Indagata la relazione di dipendenza dagli altri aspetti cruciali della capacità aeroportuale, per determinare la capacità del sistema di circolazione a terra è necessario conoscere le seguenti caratteristiche:

- Caratteristiche dell'infrastruttura di volo come segnalamento e layout,
- Condizioni meteo e visibilità,
- Modalità e tempi di comunicazione tra piloti e torre di controllo,
- Programmazione delle partenze e degli arrivi
- Efficacia dei meccanismi di Pushback
- Caratteristiche tecniche dei velivoli
- Condizioni di traffico

Per la stima della capacità dei sistemi di circolazione a terra sono disponibili in commercio software specifici, forniti dalle società che si occupano di progettazione di sistemi A-SMGCS. Alternativamente possono essere utilizzati gli algoritmi presentati al Paragrafo 2.5.

Il lavoro di tesi si concentrerà sulla valutazione della prestazione odierna di questi aspetti, introducendo miglioramenti che andranno inevitabilmente a pesare sulla capacità operativa.

3.2.3 Metodologia di approccio del lavoro di tesi

Il miglioramento dell'efficienza di un sistema di circolazione a terra passa per la minimizzazione dei tempi di taxiway e, più in generale, per l'ottimizzazione di una o più funzioni obiettivo che permettono di ottimizzare diversi aspetti della circolazione come:

- Flussi di traffico
- Emissioni
- Consumi

Intuitivamente, concentrandosi sui benefici a livello ambientale o di risparmio di carburante, la capacità dell'aeroporto ne sarà inevitabilmente inficiata. A parità di infrastruttura, all'aumento dell'attenzione ambientale avremo una diminuzione della capacità massima, perché cambieranno le velocità in pista o di approccio, così come i tempi di attesa ai gate. Di conseguenza, la valutazione di capacità di un qualsiasi aeroporto non è quindi univocamente determinata al dipendere solo delle caratteristiche fisiche del sistema, ma anche e soprattutto dagli obiettivi di gestione della circolazione a terra che vengono posti.

Il sistema oggetto di questa tesi valuterà tutti i suddetti scenari, fornendo al decisore politico uno strumento di supporto alle decisioni. La decisione del tipo di ottimizzazione da condurre sarà funzione delle necessità dell'aeroporto nell'istante considerato. In questa maniera si vuole garantire uno sfruttamento pieno delle capacità in ora di punta, andando a efficientare le procedure, garantendo l'ottimizzazione di consumi ed emissioni quando le situazioni di congestione lo permettano.

In questa sede il calcolo dell'incremento di capacità non sarà trattato per mancanza di un software di simulazione. Tuttavia, la struttura del sistema a blocchi qui proposta, efficientando le comunicazioni, è dimostrato influenzare positivamente la capacità [32].

3.3 Progettazione di un sistema A-SMGCS

La complessità della progettazione di un sistema A-SMGCS deve rispettare il bilancio tra costi e benefici.

Data la libertà concessa al singolo gestore aeroportuale di sviluppo di una soluzione, risulta fondamentale andare a comprendere i reali bisogni di un aeroporto per poter decidere al meglio le tecnologie e il loro grado di interoperabilità.

Vengono riportati i principali passi per la definizione di un progetto di implementazione efficace di un meccanismo A-SMGCS.

a. Analisi dell'odierno sistema

Individuazione dei parametri di capacità, ritardi, velocità degli aeromobili, emissioni, come illustrato nel Paragrafo 3.1 e 3.2.

È il principale termine di paragone con cui misurare il miglioramento introdotto.

b. Definizione dei need degli stakeholders aeroportuali

L'analisi parte dalla definizione delle esigenze specifiche dell'aeroporto considerato. Per la definizione delle stesse, si analizzano i dati di circolazione evidenziando la correlazione tra le situazioni di congestione e i diversi aspetti dell'ATC.

Parallelamente, si conduce un'indagine tra i controllori di volo, le compagnie aeree ed i piloti, per riportare le principali inefficienze rilevate da chi effettivamente usufruisce dell'infrastruttura. Un sondaggio tra i clienti aiuta a definire e rilevare la percezione del ritardo per l'aeroporto considerato.

Il parere degli operatori aeroportuali provvede a fornire una vista più capillare della complessità della circolazione a terra, evidenziando i principali aspetti da ottimizzare. Per la definizione dei bisogni aeroportuali, necessari a capire dove e come intervenire con il sistema proposto, ci si è affidati ai risultati del sondaggio promosso da Marchionni [32] nell'ambito della prima sperimentazione A-SMGCS a Milano Linate.

c. Analisi e definizione dei requisiti prestazionali dell'aeroporto

Successivamente all'analisi dati, e relativamente ad essa, considerando i consigli ottenuti dai sondaggi si definiscono le prestazioni aeroportuali obiettivo per il nostro sistema.

La definizione di una prestazione "Obiettivo" fissa un determinato "Gap prestazionale" rispetto alla situazione attuale, da colmare con l'adozione della

tecnologia A-SMGCS. La soddisfazione di questi requisiti fornisce un riscontro inequivocabile sul cambiamento operato introducendo il nuovo sistema. Nel nostro caso, i requisiti prestazionali da raggiungere sono principalmente dettati dalle aspirazioni di crescita dell'amministrazione aeroportuale di Malpensa, così come dai requisiti di sicurezza EUROCONTROL che richiedono continui aggiornamenti tecnologici per la mitigazione dei rischi.

d. Creazione di alternative di implementazione

Per la soddisfazione dei requisiti si creano diverse opzioni di implementazione con gradi diversi di operabilità. La valutazione di questi selezionerà il design più promettente.

e. Selezione dell'alternativa più promettente

La comparazione dei diversi scenari attraverso metodi numerici è il primo step per verificare se una soluzione effettivamente incrementa i requisiti al livello voluto. Successivamente alla costruzione del primo prototipo, lo si sottopone ad un periodo di prova in fase di esercizio. La soddisfazione dei controllori di volo e dei piloti al momento dell'utilizzo del prototipo determina la comodità di utilizzo e fornisce informazioni utili all'adattamento del software delle interfacce alle richieste degli utilizzatori. La suddetta fase non sarà implementata in sito e la soluzione sarà solo simulata.

f. Analisi di prestazione

Terminata la fase di design, si conduce un'analisi più di dettaglio riguardo i requisiti soddisfatti. Se la soluzione non fosse soddisfacente, si ritorna al punto "d".

g. Design delle tecnologie, creazione di un piano di prova e collaudo

Si provvede al design di tutte le tecnologie per scalare l'applicazione su tutto l'aeroporto. Si crea un piano di prova di durata variabile a seconda dei cambiamenti introdotti.

Ad un cambiamento più radicale, corrisponderà un piano di prova maggiore per testare il sistema in condizioni di minaccia alla sicurezza, in accordo con le normative vigenti.

Al termine della fase di collaudo si termina il processo di implementazione abbandonando definitivamente il vecchio sistema di comunicazione.

Nei seguenti capitoli relativi al caso applicativo e dedicati alla presentazione dell'aeroporto e della configurazione di sistema, verranno seguiti i primi step fino alla definizione dei requisiti prestazionali, per poi presentare la soluzione finale sviluppata, assieme ad un'analisi delle migliorie introdotte.

3.4 Considerazioni finali sullo stato dell'arte

La trattazione di questo capitolo termina dunque il panorama odierno dello sviluppo della tecnologia A-SMGCS, fornendo gli strumenti necessari per la definizione della configurazione di sistema più opportuna rispetto alle esigenze aeroportuali descritte nella seconda parte della tesi.

Le difficoltà di gestione dipendono dalle condizioni di traffico dell'aeroporto all'istante considerato. Da questo capitolo, alla luce delle considerazioni del Paragrafo 3.2.2 emerge la divisione tra:

- Ore di Punta
- Ore di Morbida

3.4.1 Problematiche nelle ore di punta

I conflitti alle intersezioni, la velocità delle operazioni di Push-back, i tempi di reazione e i tempi tecnici per trasmettere le informazioni ai veicoli quando la rete risulta occupata sono solo alcuni dei parametri che generano una situazione di confusione, responsabile della creazione di ritardi, aumento delle emissioni inquinanti e rischi per la sicurezza.

È interesse comune dunque andare a concentrare gli sforzi di ricerca per andare ad operare una soluzione che ottimizzi il controllo in queste situazioni, prevedendo e risolvendo i conflitti, ottimizzando percorsi e comunicazione e verificando automaticamente la prescrizione delle indicazioni.

3.4.2 Problematiche nelle ore di morbida

Sebbene non direttamente interessate dai fenomeni di congestione, le ore di morbida presentano un ampio margine di ottimizzazione ambientale.

Ogni aereo, partendo dalla piazzola di sosta può infatti percorrere una determinata taxiway che, in condizioni di flusso libero, non presenterà restrizioni a causa di intersezioni con altri aeromobili o per il mantenimento delle distanze di sicurezza.

Questo dà al pilota la libertà di decidere sul valore di velocità (entro i limiti) e sul valore di accelerazione da applicare al velivolo, in quanto non più vincolato in maniera stringente dal fattore tempo. Da questi ultimi parametri dipendono le emissioni ambientali e il consumo di carburante del velivolo.

Ottimizzare il profilo di velocità, ovvero l'andamento della velocità istantanea nel tempo, con criteri di salvaguardia ambientale permette un guadagno sia economico, dovuto alla riduzione dei consumi, sia ambientale, dovuto alla riduzione delle emissioni.

Parte II

Il Caso Studio: L'aeroporto di Malpensa

La seconda parte della trattazione si concentrerà sull'applicazione del concetto di A-SMGCS all'aeroporto di Milano Malpensa.

La scelta dell'aeroporto è frutto di una serie di considerazioni sul layout aeroportuale che più si prestano all'applicazione del sistema descritto ai paragrafi precedenti. La capacità complessiva, la configurazione delle taxiway e l'utilizzazione delle piste rispetto a numerosi aeroporti considerati assieme alla relativa mono direzionalità dei flussi si prestano all'applicazione di uno schema di circolazione a blocchi come descritto da Marchionni [32].

Dividendo lo schema di circolazione in due sistemi separati ma cooperativi si affronteranno i bisogni relativi alle specifiche aree dell'aeroporto, evidenziando le diverse dinamiche che caratterizzano la zona di circolazione in prossimità dell'aerostazione e la circolazione SATR.

Richiamando gli studi di Chen [7] e Zhang [56] in materia di emissioni e consumi, si costruirà un Modello Matlab della circolazione SATR di Malpensa, volto a ottimizzare i parametri di velocità tramite un Algoritmo di Active Routing scritto ad-hoc.

La struttura di funzionamento del sistema che verrà descritta alle pagine seguenti permetterà al controllore di configurare un percorso specifico omettendo la comunicazione radio, raccogliendo dati dai sistemi di sorveglianza e controllo e trasmettendo il segnale al pilota attraverso opportuni supporti a terra.

In questa maniera, nelle responsabilità del controllore permarrà comunque la pianificazione degli spostamenti a terra, ma la comunicazione radio verrà ridotta da mezzo di comunicazione ordinaria a mezzo di comunicazioni di emergenza, comportando una significativa diminuzione del carico di lavoro.

Capitolo 4

Presentazione dell'aeroporto

L'aeroporto di Milano – Malpensa (Codice IATA: MXP, Codice ICAO LIMC) è il secondo aeroporto gestito dal Comune di Milano. È situato nell'alta pianura lombarda, nel Sud-Ovest della provincia di Varese, all'interno del comune di Fermo.

AEROPORTO		Totale movimenti (numero)	Variazione anno prec.	Incidenza sul totale	Ripartizione (%)	
					Nazionale	Internazionale
1	Roma Fiumicino	304.969	3,5	21,6	32,6	67,4
2	Milano Malpensa	189.910	8,7	13,4	15,6	84,4
3	Milano Linate	93.987	-2,6	6,6	52,4	47,6
4	Venezia	89.733	5,2	6,3	15,4	84,6
5	Bergamo	88.120	4,2	6,2	24,7	75,3
6	Napoli	72.538	8,5	5,1	39,3	60,7
7	Catania	71.425	8,0	5,1	65,8	34,2
8	Bologna	67.563	0,7	4,8	21,5	78,5
9	Palermo	48.642	10,5	3,4	75,6	24,4
10	Pisa	38.512	2,6	2,7	27,9	72,1

AEROPORTO		Totale passeggeri (numero)	Variazione anno prec. (%)	Incidenza sul totale (%)	Ripartizione (%)	
					Nazionale	Internazionale
1	Roma Fiumicino	42.896.831	5,0	23,2	26,8	73,2
2	Milano Malpensa	24.561.735	11,5	13,3	16,7	83,3
3	Bergamo	12.827.267	4,9	6,9	25,4	74,6
4	Venezia	11.092.525	7,9	6,0	14,0	86,0
5	Napoli	9.903.551	15,8	5,4	34,9	65,1
6	Catania	9.815.313	8,7	5,3	65,2	34,8
7	Milano Linate	9.187.120	-3,3	5,0	52,7	47,3
8	Bologna	8.489.382	3,8	4,6	23,2	76,8
9	Palermo	6.601.472	14,7	3,6	74,6	25,4
10	Roma Ciampino	5.812.451	-0,7	3,1	3,9	96,1

AEROPORTO		Totale cargo (tonnellate)	Variazione anno prec.	Incidenza sul totale	Ripartizione (%)	
					Nazionale	Internazionale
1	Milano Malpensa	572.775	-2,9	52,5	0,2	99,8
2	Roma Fiumicino	205.862	10,9	18,9	1,9	98,1
3	Bergamo	124.111	-1,4	11,4	15,9	84,1
4	Venezia	56.572	8,7	5,2	3,9	96,1
5	Bologna	40.540	-3,4	3,7	8,5	91,5
6	Roma Ciampino	18.258	7,1	1,7	0,4	99,6
7	Milano Linate	12.571	-9,0	1,2	8,9	91,1
8	Pisa	11.174	9,5	1,0	38,9	61,1
9	Brescia	10.313	-46,9	0,9	86,3	13,7
10	Napoli	9.821	13,6	0,9	90,3	9,7

Figura 4.1: Dati di Traffico Anno 2018, ENAC [11]

Stando ai dati Enac [11], Malpensa è il secondo aeroporto italiano per

passaggeri (24,5 Milioni) e movimenti commerciali dopo Roma Fiumicino, ed il primo aeroporto italiano per traffico merci (572 Tonnellate).

Nel comparto passeggeri, è base per diverse compagnie aeree come Alitalia, Air Italy (il futuro di questa compagnia è ancora incerto, anche in relazione alla crisi COVID-19), Easyjet, Ryanair ed è Hub per Air Italy e Neos. Nel comparto merci è Hub per la compagnia CargoLux. Recentemente sono stati inaugurati i due nuovi magazzini a sud dell'aeroporto, gestiti da DHL e che puntano ad aumentare la capacità Cargo dell'aeroporto nel medio-lungo periodo.

È gestita dalla Società Servizi Aeroportuali (SEA), società che opera principalmente nel controllo dei due aeroporti Milanesi.

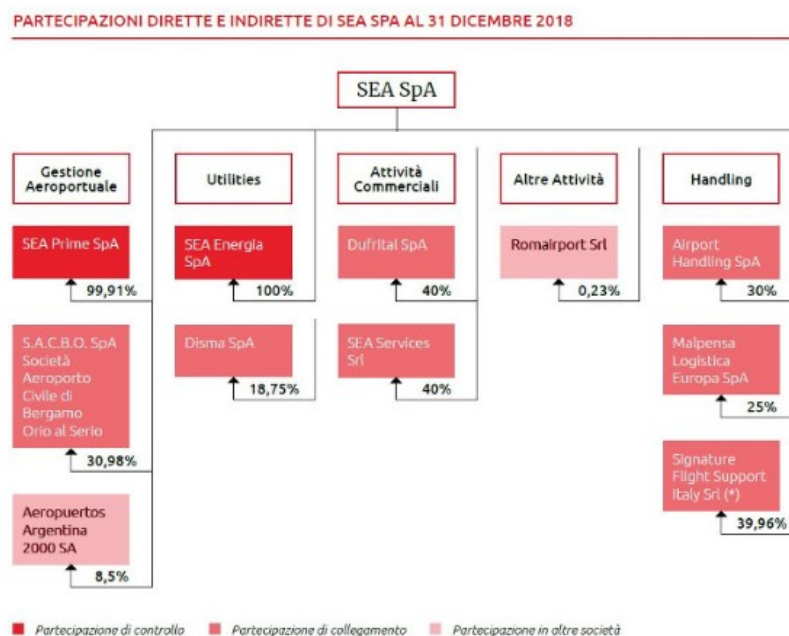


Figura 4.2: Partecipazioni dirette ed indirette SEA Airports

Negli anni, nonostante la competitività degli altri aeroporti del Nord Italia per il traffico nazionale ed internazionale a medio raggio e dei principali Hub europei per l'intercontinentale, Malpensa ha ottenuto risultati incoraggianti, come dimostrano i dati riferiti alla crescita totale dei movimenti. La leggera flessione registrata nel 2008-2009 e nel 2012-2015 sono indice della grande resistenza che l'aeroporto ha saputo tenere in un panorama complesso come quello della crisi economica.

MILANO Malpensa						
Serie storica						
Anno	Movimenti (Numero)	Variazione anno prec.	Passeggeri (numero)	Variazione anno prec.	Cargo (Tonnellate)	Variazione anno prec.
2001	236.147	-6,44	18.521.003	-9,80	289.279	-3,63
2002	212.210	-10,14	17.348.296	-6,33	293.914	1,60
2003	213.554	0,63	17.514.720	0,96	319.513	8,71
2004	214.357	0,38	18.421.598	5,18	361.237	13,06
2005	227.718	6,23	19.499.158	5,85	384.753	6,51
2006	247.456	8,67	21.621.236	10,88	419.130	8,93
2007	263.584	6,52	23.717.177	9,69	486.670	16,11
2008	212.841	-19,25	19.014.186	-19,83	415.952	-14,53
2009	183.182	-13,93	17.349.602	-8,75	344.045	-17,29
2010	189.580	3,49	18.714.187	7,87	432.673	25,76
2011	186.780	-1,48	19.087.098	1,99	450.448	4,11
2012	170.747	-8,58	18.329.205	-3,97	414.318	-8,02
2013	160.700	-5,88	17.781.144	-2,99	430.344	3,87
2014	162.953	1,40	18.669.740	5,00	469.657	9,14
2015	156.642	-3,87	18.444.777	-1,20	511.190	8,84
2016	162.683	3,86	19.311.565	4,70	548.768	7,35
2017	174.754	7,42	22.037.241	14,11	589.719	7,46
2018	189.910	8,67	24.561.735	11,46	572.775	-2,87

N.B. Dal 2016 i dati non comprendono il traffico aerotaxi

Società di Gestione	SEA SpA
Tipo di concessione	Gestione Totale
Vettore principale	EASYJET

Figura 4.3: Dati di Traffico per Milano Malpensa 2018

L'aeroporto è sviluppato su due terminal, nella mappa in Figura 4.4 contrassegnati dai numeri corrispondenti.

In aggiunta ai terminal Passeggeri, è presente il terminal Luxury Milano Prime, destinato a clientela business, e lo scalo Cargo, situato a Sud.

I terminal 1 e 2 sono collegati a Milano Cadorna e Milano Centrale tramite il Malpensa Express, che garantisce il collegamento ferroviario con la città. Il terminal 2 è operato esclusivamente dalla compagnia Easyjet, mentre il terminal 1 è utilizzato dai restanti voli charter, di linea e low cost.

Nella visione strategica degli anni 2000, Malpensa è progettata accogliere 30 Milioni di passeggeri/anno. Esso raggiunse i 24 Milioni di passeggeri nel 2007, ma in seguito alla crisi di Alitalia, principale carrier dell'aeroporto nel

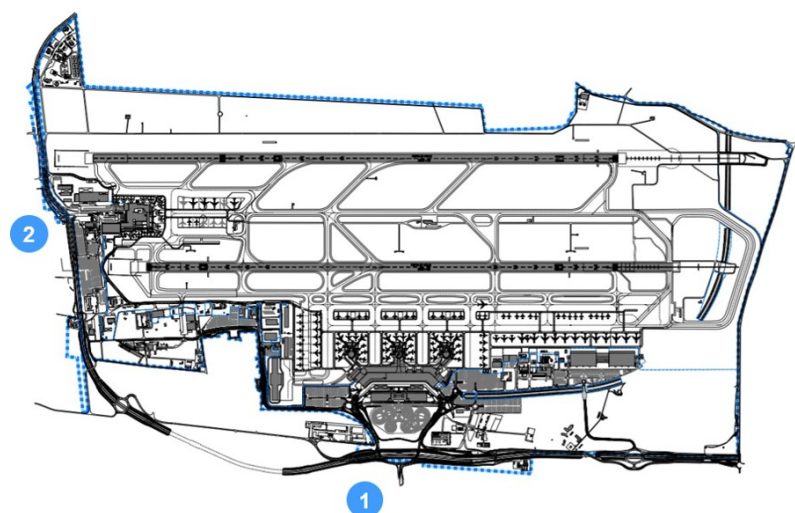


Figura 4.4: Layout dell'Aeroporto

quale aveva il suo Hub, perse 8.5 Milioni di passeggeri solo per i transiti.[35]. Solo nel recente passato lo scalo è tornato ad accogliere circa 25 Milioni di passeggeri.

In relazione alla principale funzione di scalo pensata per l'aeroporto, l'infrastruttura di smistamento bagagli è dimensionata per accogliere grandi volumi di traffico.

Nel 2008 la circolazione degli aeromobili in stazione ha subito un notevole cambio, con l'aggiunta della Taxiway Hotel (o Maniglione H) che aggira la Runway a Sud della testata 35L. Nel 2013 è stata completata la costruzione del terzo ed ultimo satellite del Terminal 1, quello più a nord, attrezzato per la ricezione degli aerei Wide-Body a due piani come l'Airbus A380.

Classificato con Categoria Antincendio ICAO 9, l'aeroporto è munito di una coppia di piste parallele, la 35L/17R e la 35R/17L, con capacità 70 mov/h. [43] Le piste sono entrambe di lunghezza 3920m e larghezza 60m. Possono ospitare il decollo e gli atterraggi degli aeromobili di categoria F, sebbene la 35L sia preferenziale.

Le Runways non sono munite di Stopway e di soglie spostate, per cui TORA, ASDA e LDA coincidono per le due piste. In atterraggio la 35R, la 35L e la 17L sono munite di ILS. Non si registrano atterraggi sulla 17R. Per la configurazione del vento gran parte dei movimenti avviene sull'asse sud-nord, quindi sfruttando le piste 35R/L.

La capacità dello scalo e i margini odierni di ottimizzazione sono riportati

nella tabella seguente, redatta da SEA seguendo uno studio del SEO Amsterdam Economics del 2017. Sull'asse delle ascisse è rappresentato il rapporto tra il numero di movimenti effettuati e quelli possibili dal layout delle piste, nel 5% delle ore più trafficate dell'anno. Su quello delle ordinate è rappresentato lo stesso rapporto ma rispetto ad un lasso di tempo di 24h.

La posizione di Milano Malpensa evidenzia un grande margine di miglioramento tra la fruizione odierna dell'infrastruttura e la capacità massima teorica del layout aeroportuale. La condizione di bassa utilizzazione nelle ore di punta testimonia come la gestione dei processi a terra possa essere radicalmente ottimizzata. [42]

POSIZIONAMENTO DI ALCUNI SCALI EUROPEI IN BASE ALL'INDICE DI UTILIZZO DELLA CAPACITÀ

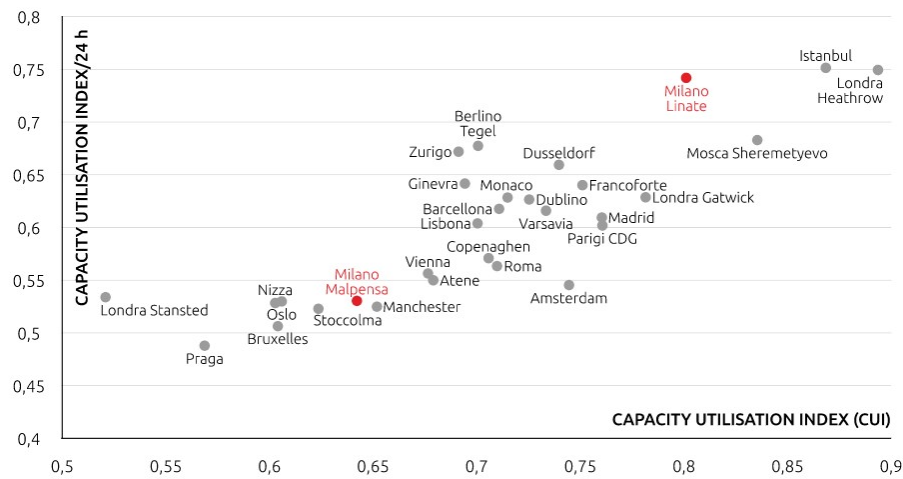


Figura 4.5: Confronto dei Coefficienti di Utilizzazione tra i Principali Aeroporti Europei

4.1 Analisi dei Movimenti a Terra

Il traffico giornaliero medio è di 501 Aeromobili, ripartiti per categoria come dalla tabella seguente. Come evidenziato al paragrafo precedente, la composizione e la numerosità del traffico aereo non ha subito grandi variazioni dal 2012 fino ad oggi, di conseguenza la statistica seguente può considerarsi ancora valida. [40]

Tabella 2: Principali tipologie di aeromobili, Malpensa 2011

Tipologia	Diurno	Serale	Notturmo	Totale
A320	217	30	26	273
737	46	9	6	61
GV	17	2	0	19
BAE 146-300	14	1	1	16
EMB145	11	3	0	14
777	8	0	1	9
747	7	1	3	11
F100	8	2	1	11
MD80	4	1	0	5
Altri	60	12	10	82
Totale	392	61	48	501

Figura 4.6: Principali Tipologie di Aeromobili in Transito a Malpensa, 2011 [40]

Il traffico è ripartito sulle due piste in funzione del valore della componente ventosa. Si nota in Figura 4.7 come la mattina presto e la sera tardi i controllori ATC utilizzino le piste 17L e 17R per favorire l'instradamento degli aeromobili diretti in fase di decollo verso sud o in fase di atterraggio da nord. Per fasce d'orario con valori di traffico più elevati, si utilizzano le piste 35R/L indipendentemente dalla rotta degli aeromobili.

La disposizione degli atterraggi e dei decolli fornisce un'importante dato sulle principali taxiway utilizzate per l'approccio in pista. Per quel che riguarda la fase di decollo, le piste sono dotate di ingressi intermedi che, stando al manuale di fruizione dell'Aeroporto di Malpensa [41] sono utilizzabili solo su richiesta del pilota o su richiesta della torre di controllo previo benestare

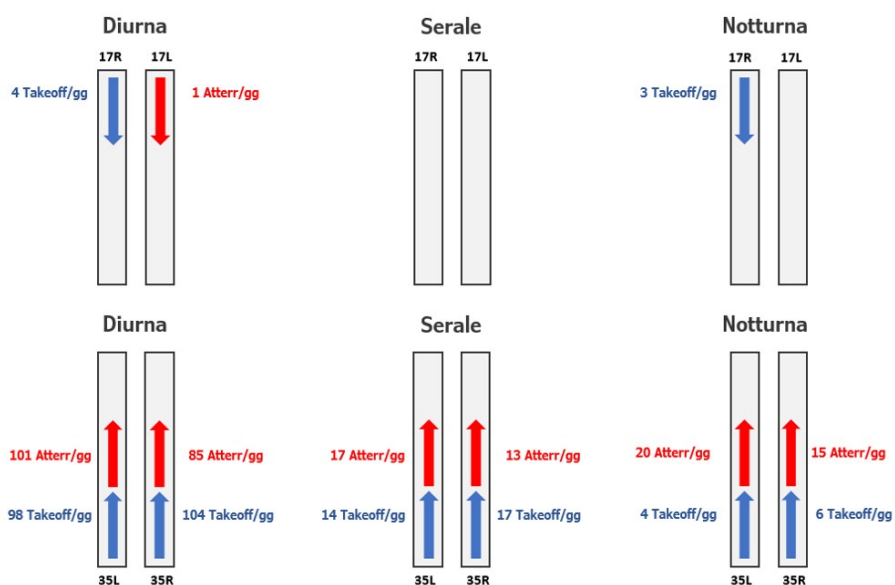


Figura 4.7: Ripartizione Decolli ed Atterraggi per Pista

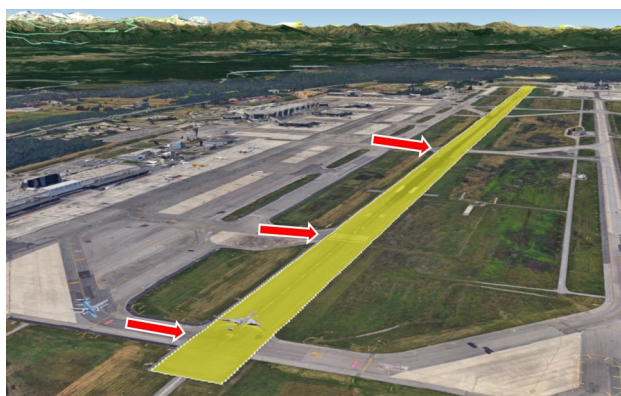


Figura 4.8: Ingressi Intermedi della Runway 35L

del pilota.

I controllori di volo indirizzano gli aerei su Taxiway preferenziali a seconda dei loro movimenti che, stando al manuale di utilizzo dell'aeroporto [41], sono:

- In uscita dalle piazzole del Terminal 1 le Kilo, Hotel e Yankee,
- In entrata al Terminal 1 la Wishky
- In uscita dal Terminal 2 la Charlie

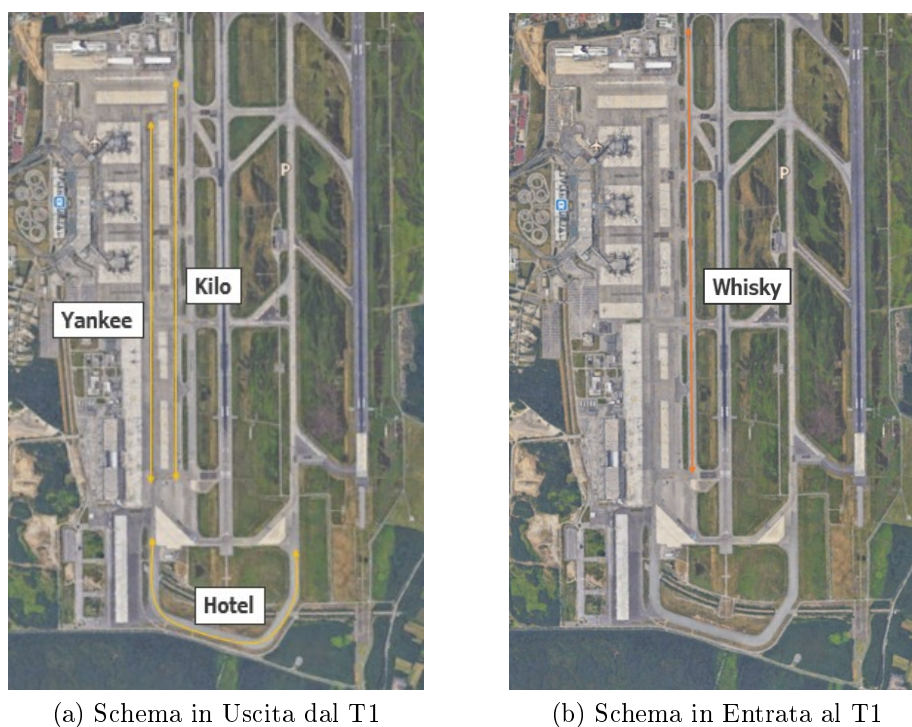


Figura 4.9: Procedure Preferenziali di Movimentazione a Terra per il T1

- In entrata al Terminal 2 la Alpha e la Bravo

Che ci aiutano a definire i percorsi più utilizzati per la movimentazione a terra degli aeromobili.

Da un'analisi delle riprese di rullaggio disponibili online, vengono ricostruiti i principali percorsi di decollo ed atterraggio degli aeromobili.

Per quel che riguarda il Terminal 1, si nota come la costruzione del raccordo Hotel abbia notevolmente ridotto i rischi connessi all'attraversamento della Runway 35L per le procedure di decollo. Al contrario, per le procedure di atterraggio permane l'attraversamento della pista di volo. Per un velivolo atteso al Terminal 1, si favorisce comunque l'atterraggio sulla 35L, per facilitarne l'ingresso in piazzola.

Le piazzole di sosta sui tre satelliti e nel Terminal 2 sono in Push-back. Per i Satelliti del Terminal 1 c'è comunque la possibilità di avere delle piazzole in Self Manouvering, se le condizioni di traffico lo permettono.

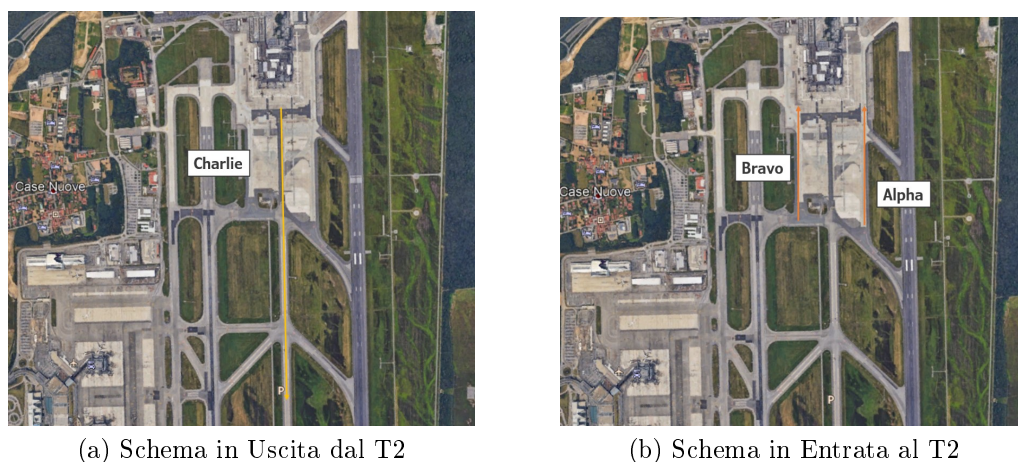


Figura 4.10: Procedure Preferenziali di Movimentazione a Terra per il T2



Figura 4.11: Percorso Preferenziale di Decollo dal T1

I rimanenti stazionamenti nel piazzale sono prevalentemente in Self Manoeuvring.

Al momento la gestione della circolazione a terra è affidata ai controllori di volo ENAV, che risiedono nella torre di controllo a sud dei 3 satelliti. La pista di volo è sprovvista di una tecnologia A-SMGCS ben coordinata, se non per l'attrezzatura radar di sorveglianza e i meccanismi di allarme contro le intrusioni in pista. Le funzioni di Routing e Guidance sono operate via radio.

La relazione sullo stato delle tecnologie di controllo aereo di Milano Malpensa, condotta da EUROCONTROL con il report sulle condizioni del progetto Local Single Sky Implementation [15] è disponibile in Appendice A.



Figura 4.12: Percorso Preferenziale di Atterraggio per i Velivoli Diretti al T1



Figura 4.13: Percorso Preferenziale di Decollo dal T2

Tramite il suo “RoadMap for Implementation”, [12] EUROCONTROL fissa i requisiti di capacità e layout minimi che dovrebbero giustificare il progetto di un impianto A-SMGCS.

- Livello di Traffico: Circa 600 Movimenti/gg
- Minimo due Runway
- Minimo di 5 giorni cumulativi di bassa visibilità l'anno

È evidente dunque che ci siano i presupposti per l'adozione di una tecnologia A-SMGCS che consideri le diverse fasi della circolazione a terra, per ottimizzarne ritardi, emissioni e consumi.

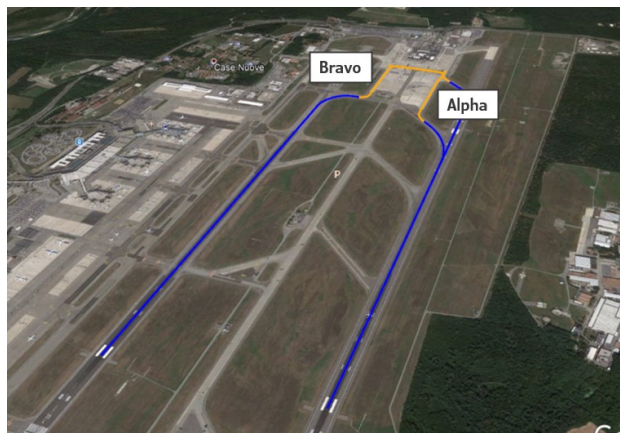


Figura 4.14: Percorso Preferenziale di Atterraggio per i Velivoli Diretti al T2

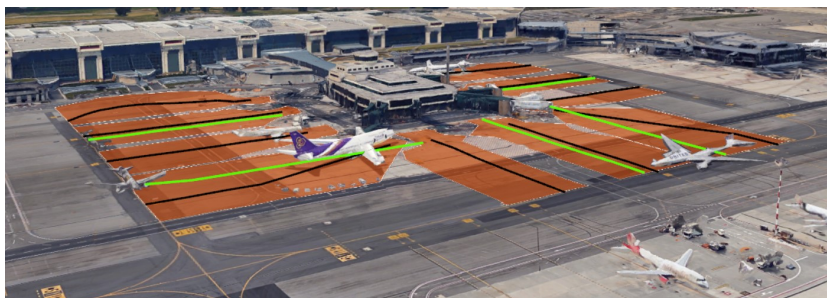


Figura 4.15: Satellite di mezzo del Terminal 1. Alcune delle piazzole secondarie (evidenziate in verde) sono in Self Manouvering.



Figura 4.16: Esempio di piazzole in Self-Manouvering



Figura 4.17: Piazzole in Push-Back, Terminal 2

La Circolazione SATR

Requisito base per l'implementazione del sistema oggetto di questa tesi nei prossimi capitoli è la presenza di un percorso STAR (Standard Airport Taxi Route). Come visto nel precedente paragrafo, il regolamento dell'aeroporto di Malpensa fornisce i controllori di volo con una lista preferenziale di taxiway da utilizzare per il rullaggio in entrata e in uscita, di modo da generare dei percorsi usuali all'interno della rete infrastrutturale e minimizzare il rischio di collisioni dovuti all'eterogeneità del traffico.

Di conseguenza, il processo di Routing di un aeromobile non sarà sottoposto ad una variabilità di percorso. Il processo decisionale del controllore riguarderà solo la partenza ad un determinato istante della piazzola di sosta, e le intersezioni saranno regolate tramite un meccanismo di precedenza. Questo aspetto è di vitale importanza in relazione allo studio dello stato dell'arte degli algoritmi di Routing illustrati al Paragrafo 2.5.

Le necessità dell'aeroporto considerato si orientano verso un meccanismo di risoluzione automatica dei conflitti alle intersezioni piuttosto che ad un procedimento di Routing e Re-Routing sul percorso più corto. La relativa semplicità del layout aeroportuale non giustificherebbe l'adozione di un algoritmo in grado di generare differenti percorsi. Il concetto di circolazione SATR sarà richiamato più volte all'interno del Capitolo 6.

4.2 L'adozione della Procedure A-CDM

Riguardo l'organizzazione dei procedimenti aeroportuali, recentemente SEA ha deciso di adottare la procedura A-CDM per la gestione del traffico Aereo. L'Airport Collaborative Decision Making (A-CDM) è una procedura operativa volta a migliorare la gestione del traffico aereo attraverso un maggiore scambio di informazioni tra tutti gli stakeholders (operatori aeroportuali, handler, compagnie aeree, controllori del traffico aereo, CFMU- Central Flow Management Unit).



Figura 4.18: Presentazione della Procedura A-CDM per SEA Airports

Questa nuova procedura consente di ottimizzare l'efficienza e la puntualità attraverso l'efficientamento del flusso di traffico e della gestione della capacità aeroportuale, riducendo i ritardi, migliorando la prevedibilità degli eventi e ottimizzando l'utilizzo delle risorse.

La comunicazione tra i diversi organi all'interno dell'aeroporto permette di creare un piano di pre-partenza che consideri il movimento aereo nel suo complesso. Dal momento in cui comincia la fase di avvicinamento fino al momento in cui terminerà la fase di salita, essendo ripartito. L'organizzazione di questo procedimento completo permette l'ottimizzazione delle procedure di pulizia, rifornimento, Push-Back e circolazione a terra.

Ai fini della nostra trattazione, la procedura A-CDM è di vitale importanza in quanto permette la conoscenza delle caratteristiche tecniche dei velivoli in rullaggio. Come si vedrà in seguito, il programma sviluppato in questa

tesi necessita degli input tecnici dei motori dei velivoli e dalle caratteristiche geometriche, che sono facilmente reperibili dai database A-CDM. Allo stesso modo, il sistema A-SMGCS permetterebbe l'accesso ai dati grezzi raccolti dal sistema di sorveglianza e a tutti i dati elaborati dal sistema stesso, aumentando le capacità operative della procedura A-CDM.

La possibilità di implementazione di un sistema A-SMGCS si pone dunque come parte integrante del progetto A-CDM.

4.3 Considerazioni e Definizione degli Obiettivi

Richiamando il report sulle condizioni del progetto Local Single Sky Implementation [15] riportato in Appendice A, ed in linea con le criticità evidenziate nel trattamento dello stato dell'arte, le problematiche riscontrate all'interno di Milano Malpensa riguardanti i gap prestazionali di capacità operativa sono da imputare alla mancanza di un meccanismo di verifica delle Clearance di movimento, di un sistema di assistenza ai controllori di volo, di un sistema di Routing e dell'implementazione delle più moderne barriere rilevamento e prevenzione delle intrusioni.



Figura 4.19: Odierno Schema di Funzionamento della Comunicazione Aeroportuale

La gestione attiva dei profili di velocità non è considerata, ignorando dunque una possibilità di miglioramento delle prestazioni ambientali e di consumi della fase di rullaggio.

La proposta oggetto di questa tesi si pone l'obiettivo di:

- Incrementare la capacità operativa
- Diminuire le emissioni
- Diminuire l'inquinamento
- Ottimizzare i Ritardi
- Incrementare le procedure di sicurezza e diminuire i rischi
- Garantire l'operatività in condizioni di bassa visibilità

Proponendo un sistema:

- Affidabile, che presenti un grado di interoperabilità e ridondanza necessario per assicurare la sicurezza,
- Economico, che non comporti una riorganizzazione del layout aeroportuale o la costruzione di nuove infrastrutture,

- Efficiente, che garantisca prestazioni migliorate stabilmente nel tempo,
- Semplice, che sia facilmente leggibile ed interpretabile dal personale preposto.

4.4 Configurazione generale del sistema proposto

Tramite l'analisi aeroportuale condotta finora, risulta evidente come la superficie aeroportuale presenti delle zone caratterizzate da una circolazione a terra concettualmente diverse da altre. È il caso della circolazione nei pressi dell'aerostazione, dove la concomitanza di molte procedure organizzative richiede velocità e misure di sicurezza pensate in maniera specifica, o della circolazione SATR, dove i flussi sono prevalentemente diretti a senso unico, in una configurazione priva di conflitti trasversali o frontali.

Ai fini della trattazione, è quindi interessante evidenziare le situazioni dove le traiettorie degli aeromobili sono particolarmente conflittuali e dove invece i movimenti sono effettuati in coda.

A questi due schemi di circolazione sono associati rischi diversi, dipendenti dalle possibilità e dalle modalità di incidente. Un'organizzazione efficace della circolazione considera l'entità dei due rischi e provvede a fornire strumenti di mitigazione e gestione del rischio dipendenti dalla tematica analizzata.

In corrispondenza delle aree terminali, la circolazione è frammentata e le velocità sono basse. La possibilità di tamponamenti, urti con ostacoli o incidenti alle intersezioni è notevole ed aumenta con il numero di partenze orarie ed il numero di movimenti, quindi in corrispondenza dell'ora di punta. L'efficientamento delle operazioni a terra diminuisce il rischio di collisioni anche con i veicoli di servizio. Le traiettorie si incrociano, le precedenza vengono regolate via radio. Questo è particolarmente inefficace in situazioni di bassa visibilità.

Lungo i raccordi di arrivo agli holding point è notevole la possibilità di tamponamenti, di violazione delle prescrizioni di divieto di accesso, di fraintendimento delle comunicazioni che può portare ad incidenti, anche derivanti da Runway Incursion.

Riprendendo l'attività di Teusch e Marchionni [49] [32] ed aggiornandola tramite l'implementazione di algoritmi di efficienza ambientale e prevenzione e analisi dei conflitti presentati in seguito, il sistema proposto da questa tesi si basa sull'integrazione di due sistemi interoperativi a formare un organismo di gestione della circolazione a terra nel suo complesso.

Il primo, nei pressi delle aerostazioni, gestisce ed ottimizza la circolazio-

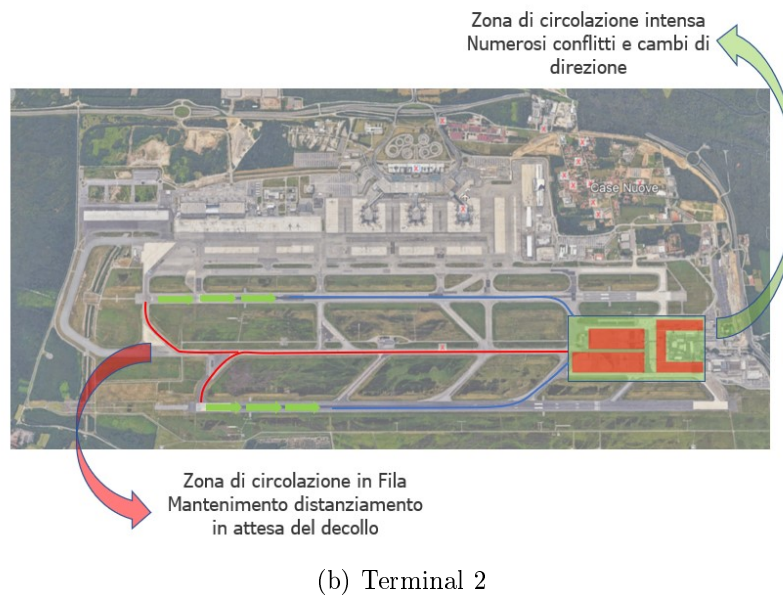
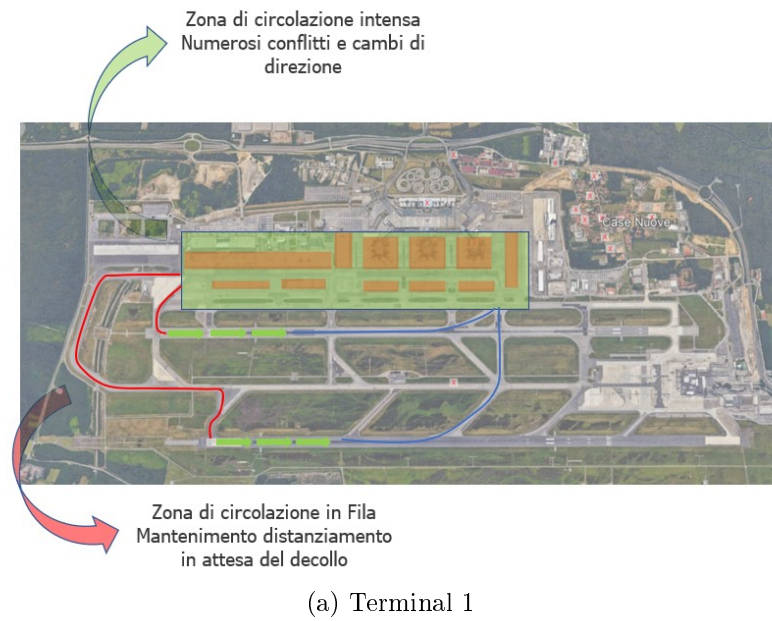


Figura 4.20: Individuazione e Classificazione delle Zone di Conflitto per i Movimenti a Terra

ne tramite un sistema a blocchi volto a ridurre al minimo la comunicazione vocale e a provvedere il controllore di volo con uno strumento di situational-awareness che ne aumenti l'efficienza produttiva.

Il secondo, per la circolazione STAR (Standard Airport Taxi Routes) ottimizza i movimenti tramite un sistema a blocchi che, rispetto al sistema nei pressi delle aerostazioni fornisce un meccanismo di Guidance completamente automatizzata ed un sistema di Active Routing (Par. 6.4.1) volto ad ottimizzare le emissioni ed i consumi.

La configurazione complessiva dei due sistemi è pensata per fornire uno strumento di controllo e previsione dei conflitti, basata su algoritmi matematici che analizzano posizione e velocità istantanea dei velivoli e ne verificano la compatibilità con i vincoli di sicurezza (RPA, Prescrizioni di stop alle intersezioni) e con le decisioni dei controllori di volo. Il sistema ha inoltre la possibilità di verificare la compatibilità delle prescrizioni ATCOs con le zone protette.



Figura 4.21: Configurazione del Sistema a Sezioni di Blocco

Nella trattazione di questo capitolo, a valle di un'analisi della circolazione di Milano Malpensa basata sui flussi e sulle capacità di ottimizzazione della fruizione aeroportuale, vengono evidenziati due sistemi:

- Circolazione SATR
- Circolazione in stazione

Che verranno trattati in maniera totalmente distinta, come descritto al Paragrafo 4.4

Vengono individuate le taxiway Hotel e Charlie come principali arterie delle procedure di rullaggio, di seguito analizzate nei processi di ottimizzazione.

Capitolo 5

La circolazione "in stazione"

Secondo la divisione apportata al capitolo precedente, la circolazione in stazione si propone di generare un sistema di gestione, regolazione e controllo delle fasi di rullaggio prima dell'inserimento delle taxiway "di linea".

Per gli aeroporti maggiormente trafficati e per le ore di punta l'elevata numerosità degli aeromobili in pista determina condizioni di congestione che si riflettono sia in costi derivanti dai rischi di collisioni che dagli elevati consumi di carburante.

In questo capitolo viene affrontata la tematica della riduzione dei rischi e dell'efficientamento della comunicazione attraverso la determinazione di un sistema che sia in grado di:

- Localizzare e segnalare la presenza di aeromobili in rullaggio
- Garantire i corretti distanziamenti tra gli aeromobili in rullaggio
- Localizzare e segnalare la presenza di eventuali veicoli sulla pista
- Garantire i distanziamenti rispetto ai veicoli circolanti in pista
- Gestire le precedenza alle intersezioni
- Segnalare le prescrizioni di marcia ai piloti
- Ottimizzare la capacità operativa

Il sistema configurato è in capacità di fornire al controllore di volo le caratteristiche dell'aeromobile, gli orari di partenza previsti e lo status delle strumentazioni di bordo. Il controllore, supportato dunque da queste informazioni procede alla creazione di un percorso.

Vengono qui definite le prescrizioni visive delle indicazioni di traffico, annullando o riducendo le comunicazioni radio alle sole comunicazioni di emergenza.



Figura 5.1: Innovazione introdotta nel processo di comunicazione nei pressi dell'aerostazione

Una configurazione dei segnali di allerta viene proposta, di modo che il controllore possa intervenire per degradare la marcia o risolvere il conflitto rilevato.

5.1 Il sistema a blocchi: lunghezza delle sezioni

Requisito fondamentale per l'implementazione di un sistema a blocchi è quello di definire il corretto distanziamento tra gli aeromobili in rullaggio. Per fare ciò, viene descritto in questo paragrafo il meccanismo di determinazione della lunghezza delle sezioni. Particolare importanza riveste la determinazione del tempo di reazione, che verrà trattato alla pagina seguente.

Malpensa non dispone di una particolare regolamentazione riguardo le velocità massime degli aeromobili in fase di taxiway. L'ENAC, nel suo manuale per l'esercizio e la costruzione di aeroporti (Italia, 2003) specifica una velocità massima solo per le uscite ad alta velocità.

Di conseguenza, traendo spunto dalle velocità adottate in studi simili e già citati in precedenza al Paragrafo 2.5, le velocità e le accelerazioni di riferimento sono adottate come segue [7]:

$$V_{\max} \text{ in curva} = 10 \text{ nodi} = 5.14 \text{ m/s}$$

$$V_{\max} \text{ in rettilineo} = 30 \text{ nodi} = 15.43 \text{ m/s}$$

$$\text{Decelerazione massima} = 0.98 \text{ m/s}^2 \text{ arrotondato a } 1 \text{ m/s}^2$$

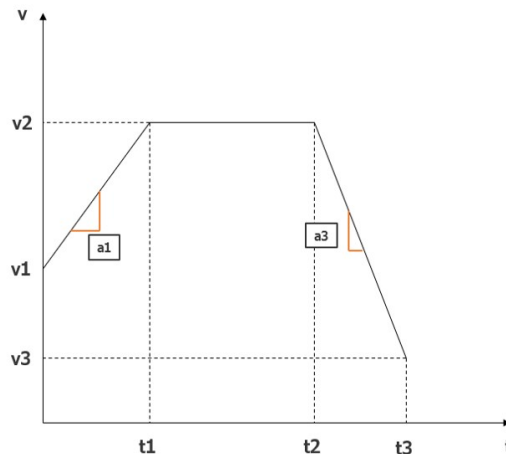


Figura 5.2: Generico diagramma di trazione adottato per velivolo in taxiway

Per la trattazione di questa tesi, lo spazio di distanziamento longitudinale massimo tra due aeromobili viene calcolato come:

$$SpazioTot_{arresto} = S_{percezione} + S_{intervento} + S_{arresto} + FrancodiSic. \quad (5.1)$$

Dove lo spazio di percezione e quello di intervento vengono qui ipotizzati uguali a 2 secondi. La scelta di tale valore deriva dai dati presenti in letteratura. Tuttavia, questi dati si riferiscono al tempo di reazione del pilota nei confronti di uno stimolo visivo.

Vista la mancanza di uno studio appropriato che determini in maniera univoca il tempo di risposta della sala di comando e il tempo di trasmissione della comunicazione di emergenza, il valore viene mantenuto.

Futuri sviluppi dovranno tenere conto di una stima del tempo totale di reazione derivante da una campagna di rilevamento.

$$S_{percezione} + S_{intervento} = v_{max} * \tau = 15.43m/s * 2sec = 31m \quad (5.2)$$

Il franco di sicurezza è definito come il minimo tra:

- La minima distanza tra due aeromobili in coda,
- La minima distanza di sicurezza nei confronti del fenomeno del jet blast.

Esso è considerato uguale a 45m in circolazione e 25m nelle sezioni di incolonnamento (Per analogia con le esistenti sezioni). Per la circolazione in linea, gli spazi disponibili permettono un distanziamento di 75m. Il fenomeno del jet blast viene trascurato viste le basse spinte dei motori in fase di rullaggio. Come illustrato nella figura seguente, in caso di regolare funzionamento del sistema gli aerei si fermano in corrispondenza delle stop bar.

Per la situazione in Figura 5.3 e riferita al raccordo Hotel, la stop bar, ipotizzando una lunghezza delle sezioni di 150 metri, si trova ad almeno 75 metri dall'aereo successivo (Calcolo ottenuto sottraendo la lunghezza dell'aereo più lungo in circolazione, il Boeing 737-8 lungo 76m).

Nei calcoli seguenti dunque, sarà ignorato il contributo del franco di sicurezza alla lunghezza delle sezioni per i motivi appena illustrati.

Nel caso di aereo in avaria in pista o di incendio, dove dunque l'arresto dell'aereo non è garantito in corrispondenza della stop bar e di conseguenza il franco di sicurezza non è di 75 m, la circolazione aerea sulla taxiway interessata viene bloccata all'istante in tutte le sue sezioni, inducendo tutti gli aerei in circolazione all'arresto immediato.

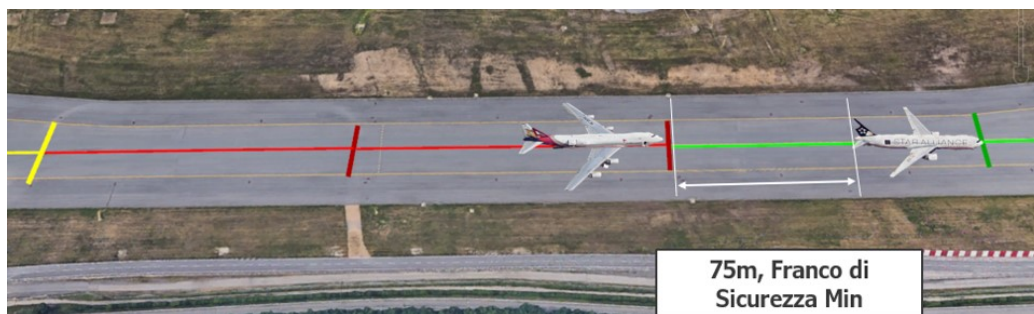


Figura 5.3: Visualizzazione del franco di sicurezza

Considerando il diagramma di trazione fornito per il taxitime [7] in Figura 5.2 siamo in grado di determinare lo spazio di frenatura totale per la definizione della lunghezza delle sezioni:

$$S_{arresto} = \frac{v_f^2 - v_0^2}{2d} \quad (5.3)$$

Considerando il valore in metri al secondo otteniamo il seguente spazio di frenatura, calcolato per la velocità massima ammissibile.

$$S_{arresto} = \frac{v_f^2 - v_0^2}{2d} = 119m \quad (5.4)$$

Lo spazio tot di frenatura è posto dunque uguale a:

$$SpazioTot_{arresto} = 31m + 119m + 75m = 225m \quad (5.5)$$

Che a meno del franco di sicurezza, per i motivi rappresentati in Figura 5.3,

ci fornisce la lunghezza minima della sezione:

$$LunghezzaSezione_{min} = 31m + 119m + 0m = 150m \quad (5.6)$$

La configurazione finora ottenuta si basa sull'assunzione di velocità massima riportata all'inizio del Paragrafo. Queste considerazioni sono valide in generale per la fase di circolazione SATR. Per la circolazione nei pressi dell'aerostazione, le stesse considerazioni portano ai risultati in Tabella 5.1. La differenza nelle velocità consentite dalla configurazione a blocchi sono frutto del particolare layout dell'infrastruttura, che non permette la divisione in sezioni di 150m in tutte le aeree dell'aeroporto.

	V Max (m/s)	S.tot di arresto			L Sez (m)
		Reazione (m)	Arresto (m)	Fr.Sic. (m)	
SATR	15.4	31	119	75	150
Aerostazione	14.2	28.4	101	45	120
Holding Point	12.3	24.6	75.6	25	100

Tabella 5.1: Caratteristiche delle sezioni per le diverse zone dell'aeroporto

5.2 Configurazione generale del sistema

Nell'ottica di costruire una configurazione generale del layout previsto viene di seguito riportata la configurazione delle sezioni per l'area immediatamente adiacente ai satelliti del Terminal 1.

Per brevità della trattazione, non vengono rappresentate le sezioni riferite all'aeroporto nel suo complesso.



Figura 5.4: Layout delle Sezioni in Corrispondenza del Terminal 1, Vista da Ovest

Per i fini del lavoro di questa tesi, le sezioni vengono strutturate in base al layout dell'aeroporto per garantire una frammentazione maggiore possibile. In sviluppi successivi, qualora le velocità rilevate e i margini di sicurezza non siano successivamente elevati, si dovrà considerare la possibilità di concatenare le sezioni per incrementare le velocità di percorrenza.

La mancanza di una base dati sufficientemente ampia per questa valutazione non rende possibile trovare il valore ottimale della lunghezza.

La configurazione del sistema è dunque da considerarsi puramente esemplificativa della configurazione finale. Difatti, i processi di seguito descritti risultano comunque validi indipendentemente dal layout adottato.

Le intersezioni sono caratterizzate da una sezione unica che assume un determinato colore a seconda dello stato di occupazione della stessa, o della sua chiusura a seconda delle precedenze inserite dal sistema di gestione.

Di conseguenza, per meglio comunicare il segnale di chiusura o di via libera ad un pilota in sopraggiungimento all'intersezione, è implementato un sistema di stop-bar semaforiche.

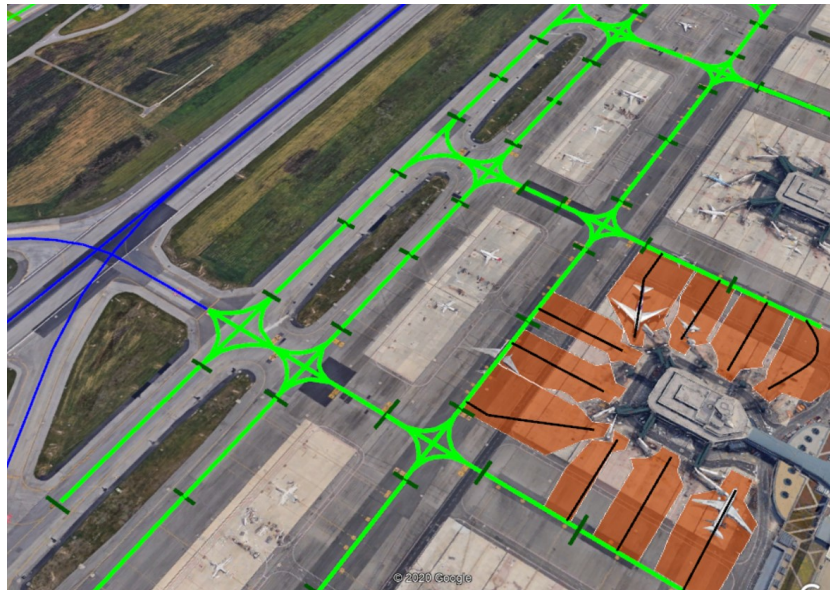


Figura 5.5: Layout delle Sezioni in Corrispondenza del Terminal 1, Vista da Nord

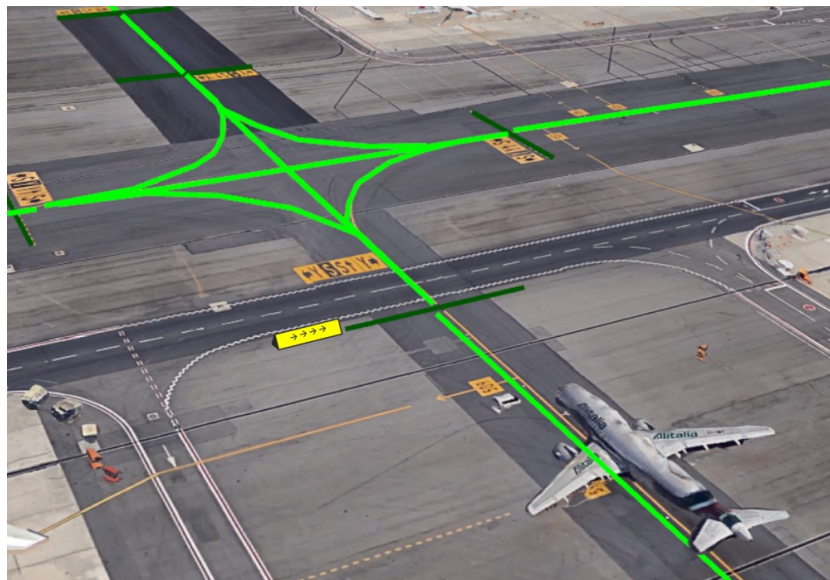


Figura 5.6: Layout tipo Intersezioni. Indicazioni di Svolta Riportate a Lato della Pista.

Le indicazioni sul percorso da seguire sono riportate a bordo pista tramite un sistema di schermi che visualizzano le prescrizioni e tramite il sistema FtG. Questi hanno ruolo di supporto rispetto alle mappe delle taxiway già

in dotazione all'aeromobile e alle indicazioni fornite in partenza dai Visual Docking System, riportati al Paragrafo 5.2.1.

L'implementazione degli schermi direzionali è subordinata alla presenza di piloti inesperti e alla sufficiente disponibilità di informazioni di rullaggio, oltre che dipendere dalla implementazione del sistema FtG. Futuri sviluppi si propongono di valutare questa necessità sulla base di sondaggi somministrati direttamente ai piloti, principali fruitori dell'infrastruttura, e ai controllori di volo.

5.2.1 Visual Docking Systems

Le piazzole di sosta sono organizzate per permettere l'ottimizzazione delle procedure di partenza tramite un sistema di raccolta e sviluppo dati che comunichi costantemente con la torre di controllo, aggiornandola rispetto agli stadi di preparazione dell'aeromobile come rifornimento e pulizia e che al contempo sia in grado di prescrivere all'aeromobile informazioni relative alla partenza.

Tennendo in mente l'impossibilità di operare a bordo della cabina di pilotaggio andando a modificare la tecnologia esistente, si considera l'installazione dei Visual Docking Systems, schermi che hanno al funzione di rappresentare le informazioni di volo e di fornire un metodo di comunicazione visivo tra la torre di controllo ed il pilota.

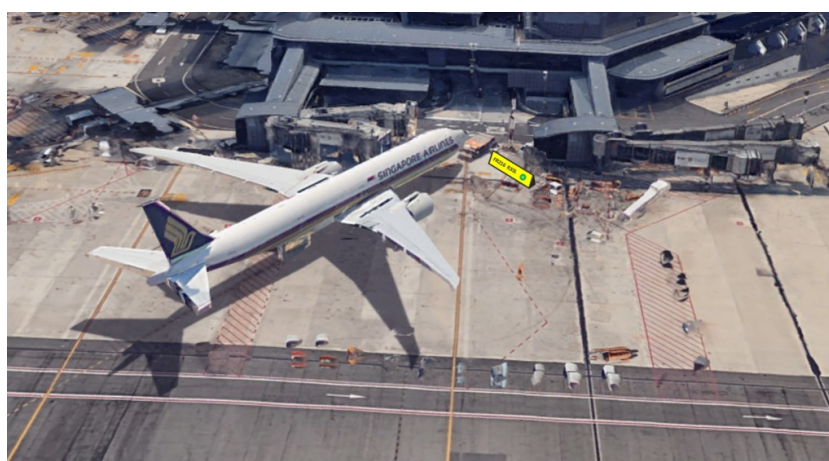


Figura 5.7: Visual Docking System per Piazzola di Sosta

La comunicazione radio dunque, evidenziata all'inizio del precedente capitolo come la problematica maggiore a livello di sovraccarico di lavoro ed inefficienze di gestione del tempo, viene superata.

L'aeromobile, prima della chiusura del portellone, trasmette la sua disponibilità alla partenza alla torre di controllo.

Il controllore, autorizzando la partenza dell'aeromobile ed assegnando un percorso, genera un input che viene mostrato sul Visual Docking System. Il pilota dispone dunque del tempo necessario ad elaborare le informazioni e a procedere con il termine delle operazioni di preparazione al decollo, limitando la possibilità di fraintendimenti o di difetti di comunicazione nel senso più generale.

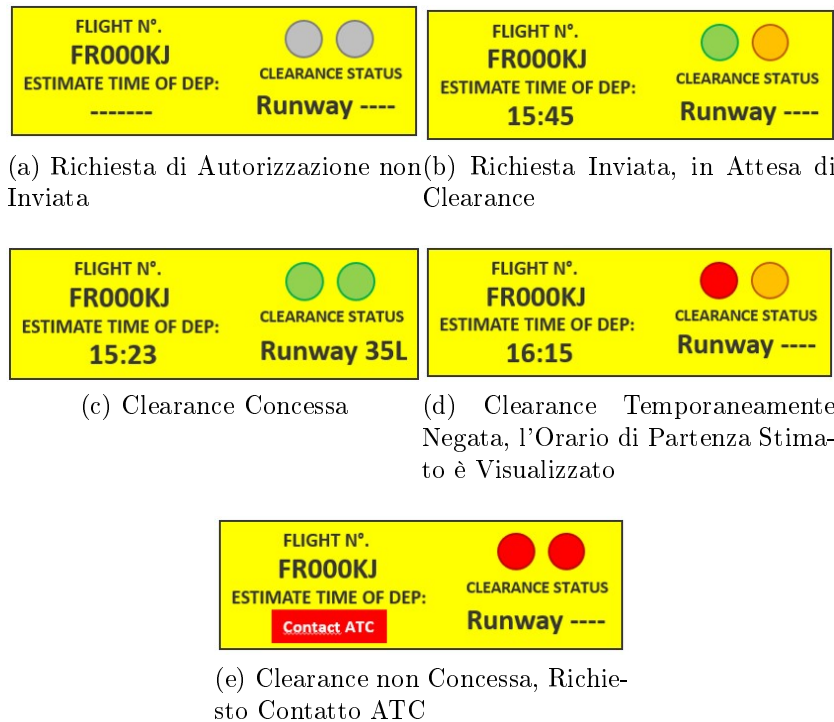


Figura 5.8: Configurazioni possibili dei Visual Docking Systems

In Figura 5.8 è riportata la proposta di configurazione dei Visual Docking Guidance Systems. Il layout è stato ipotizzato in concordanza con le normative vigenti in merito di segnaletica di informazione aeroportuale, che prevedono un pannello a sfondo giallo con scritte nere per indicazioni di destinazione.

- Status della richiesta di partenza.
 1. Non inviata
 2. Inviata, in attesa di risposta
 3. Clearance alle operazioni di partenza, in Push back o in Self Maneuvering a seconda della configurazione della piazzola
 4. Rifiuto temporaneo della clearance
 5. Rifiuto della clearance
- Orario previsto di partenza, nel caso in cui la clearance non sia stata concessa
- Numero di volo considerato, per fornire un duplice controllo sulla correttezza delle operazioni di assegnazione
- Runway Assegnata per il decollo

5.2.2 Taxiway e luci di bordo pista, stopbars

Per sottostare alla necessità di garantire la Guidance degli aeromobili senza sovraccaricare il pilota, le linee di centre line caratteristiche di ogni sezione vengono progettate per cambiare colore a seconda dello stato di occupazione delle stesse. In questa maniera si garantisce la comunicazione dello stato di occupazione delle sezioni e delle svolte prescritte alle intersezioni.

Le stopbar garantiscono un'efficace comunicazione oltre che un riferimento per la definizione delle sezioni. Hanno inoltre la funzione di rilevamento della violazione delle prescrizioni, essendo equipaggiate di un meccanismo che rileva eventuali passaggi non autorizzati.

La rilevazione avviene attraverso particolari barriere a microonde posizionate in prossimità dei margini delle sezioni.

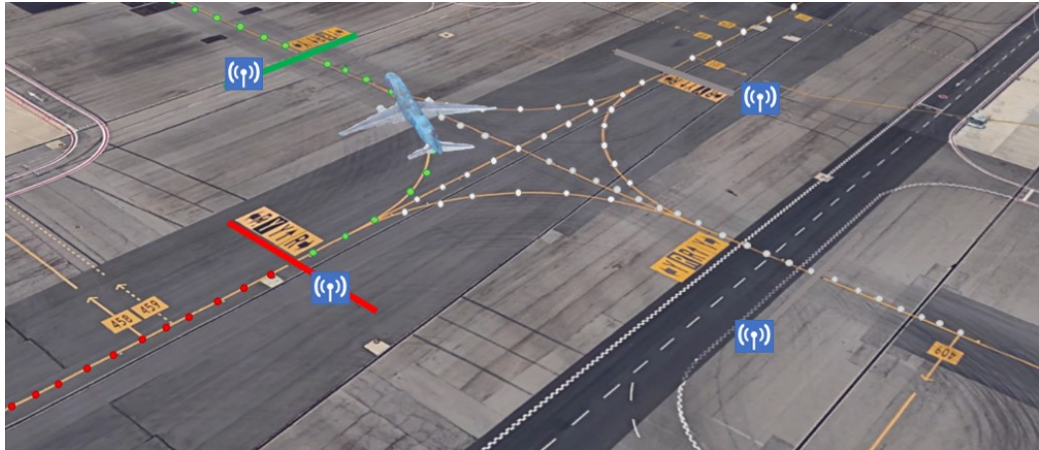


Figura 5.9: Configurazione Luci di Taxiway, Particolare di un'Intersezione

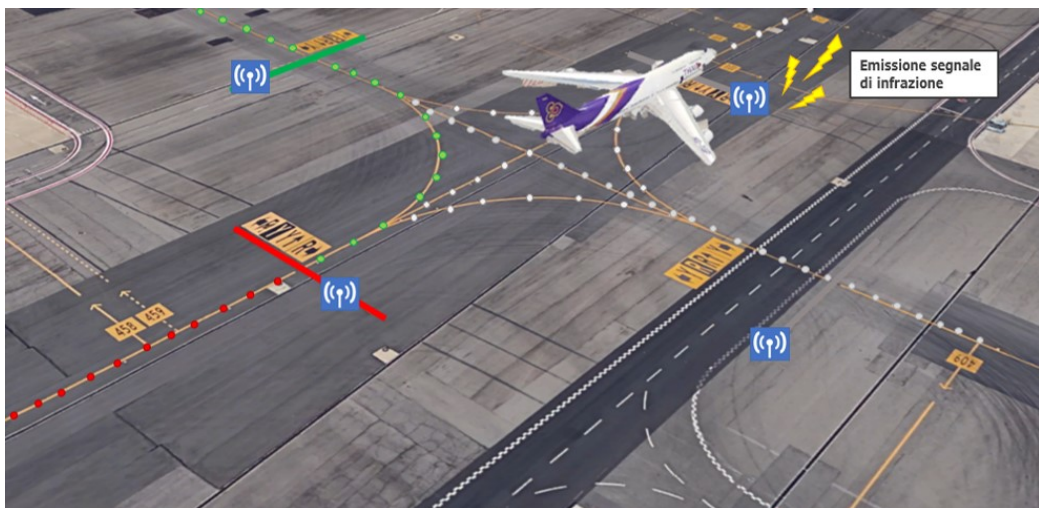


Figura 5.10: Controllo sulla Prescrizione di rullaggio operata tramite barriere a microonde

5.3 Funzionamento del sistema

Riprendendo i concetti espressi al Paragrafo 2.3.3, ed il parallelismo con il modello ferroviario espresso nel Paragrafo 4.4, la configurazione della soluzione si basa sul concetto di Human Machine Interface.

Nei prossimi paragrafi viene descritto il funzionamento del sistema in stazione, dal rilevamento dell'aeromobile e alla prescrizione di partenza fino alla gestione automatica delle intersezioni.

5.3.1 Osservazione

Disposizioni barriere a microonde

L'identificazione della posizione dell'aeromobile viene ottenuta tramite l'integrazione dei sistemi a microonde e i sistemi SMR. La dualità delle informazioni permette di tracciare con continuità un aeromobile una volta note tutte le sue caratteristiche, garantendo il rispetto delle prescrizioni sullo spostamento a terra. Il meccanismo deve essere affidabile per l'individuazione di eventuali infrazioni.

La poca precisione del sistema SMR in condizioni meteo avverse e la periodicità del segnale che genera delle regioni di vuoto non sono compatibili con le richieste di precisione della configurazione desiderata. Tuttavia, la collaborazione delle tue tecnologie fornisce un ulteriore livello di protezione contro i malfunzionamenti dell'uno o dell'altro sistema, garantendone la resilienza in caso di guasto.

La configurazione della barriere a microonde è riportata in Figura 5.9. Come successivamente proposto al Paragrafo 6.2.2, la funzione delle barriere microonde è anche quella di rilevare la velocità, nell'ottica di fornire uno strumento decisionale in grado di prevedere, oltre che a rilevare, eventuali violazioni delle prescrizioni.

Rappresentazione del sistema

Le informazioni derivanti dall'osservazione del sistema, opportunamente arricchite dalle informazioni derivanti dall'implementazione della procedura A-CDM espressa al Paragrafo 4.2 vengono visualizzate sull'interfaccia del controllore di volo, unitamente alle informazioni rappresentanti lo status di ogni componente elettronico del sistema.

Lo scopo di questa rappresentazione è quello di fornire consapevolezza al controllore di volo della quantità di movimenti e dalle problematiche ad essi correlati nella gestione della circolazione a terra.

5.3.2 Programmazione itinerario

Considerando gli input del sistema di osservazione, che forniscono posizione, velocità, identità, orario programmato di partenza, status delle procedure di imbarco, orario effettivo previsto di partenza, orario di arrivo, orario programmato di arrivo; il controllore tramite la sua interfaccia decide che percorso assegnare all'aeromobile considerato.

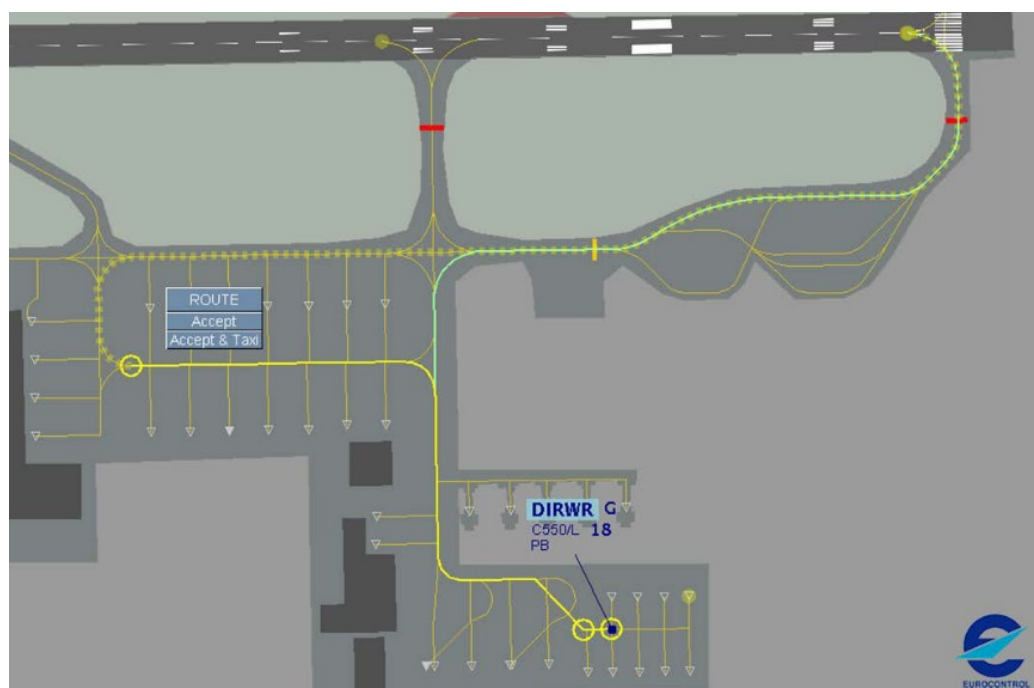


Figura 5.11: Esempio Programmazione Itinerario con HMI dal manuale EUROCONTROL

Una volta aver preso in considerazione la richiesta di decollo che è stata emessa dal pilota in attesa del via libera, il controllore di volo sulla sua interfaccia può visualizzare la condizione di traffico dell'aeroporto e, attraverso opportuni sistemi, comprendere se poter permettere all'aereo la partenza. Il momento in cui il controllore volesse far partire l'aereo, il sistema A-SMGCS propone una lista di itinerari possibili in grado di minimizzare lo spostamento totale.

Vista la divisione operata fino ad ora nei concetti di circolazione in linea ed in aerostazione, è evidente che il sistema proporrà un percorso volto ad inserire l'aereo all'interno del sistema di circolazione in linea, per poi lasciarlo in

mano al sistema di Guidance automatica fino all' Holding Point.

Nella creazione di questo itinerario, il sistema compie dei passi principali che sono riassunti nelle sottosezioni successive. L'importanza di questi passaggi nasce dalla grande quantità di rischi derivanti da una situazione di congestione. L'interesse del controllore di volo è quello di non far incrociare traiettorie di aeromobili diversi.

Per questo motivo, il meccanismo di assegnazione del percorso permette ad un determinato velivolo la prenotazione di un determinato percorso per il lasso di tempo necessario al completamento della manovra. In questa maniera, intersezioni e sezioni rifletteranno lo stato di occupazione che la sezione ha e che programma di avere, di modo da minimizzare la possibilità di conflitti anche in situazioni di visibilità notevolmente inferiori alla media.



Figura 5.12: Programmazione itinerari con HMI. Gli itinerari sono in conflitto, dunque necessitano di un meccanismo di precedenza

Una volta deciso l'itinerario, il sistema compie una serie di operazioni prima dell'effettivo segnale di via libera comunicato tramite il Visual Docking System, come enunciato al Paragrafo 5.2.1:

- Verifica di Liberazione delle Sezioni,

- Manovra degli Elementi,
- Verifica di Configurazione delle sezioni,
- Bloccamento degli enti,
- Apertura del segnale di manovra tramite VDS,
- Liberazione Elastica dell'Instradamento

5.3.3 Verifica di Liberazione degli Enti

Il sistema, dopo aver ricevuto dal controllore di volo l'input del percorso che vorrebbe assegnare ad un determinato aeromobile, verifica effettivamente che le sezioni siano libere. La verifica tecnica della liberazione delle sezioni si esercita in due diverse maniere:

- Verifica che le sezioni siano correntemente libere da aeromobili e veicoli
- Verifica che le sezioni non siano occupate da un altro itinerario determinato precedentemente

La cooperazione tra barriere a microonde e SMR fornisce un'informazione dettagliata sullo status della circolazione al momento della decisione di formare l'itinerario ed è dunque il principale metodo con cui comprendere l'occupazione in tempo reale delle sezioni.

Dall'altra parte, la pianificazione di un itinerario innescherà un meccanismo per il quale il software implementato è in grado di bloccare l'itinerario fino all'effettivo passaggio dell'aeromobile.

In questo modo, la richiesta di creazione di un itinerario su delle sezioni che sono bloccate genera un errore nel procedimento di creazione dell'itinerario, che porta a due possibilità:

1. **Ritardare la clearance** per il rullaggio
2. **Assegnare la clearance**, condizionata al raggiungimento di una determinata intersezione, in prossimità della quale l'aeromobile dovrà fermarsi per permettere a quello con la precedenza di terminare la sua manovra.

La scelta della procedura da adottare è selezionata al momento del segnale di conflitto da parte del controllore. Orientativamente, a delle situazioni di morbida si preferirà aspettare per poter sfruttare al massimo l'inerzia

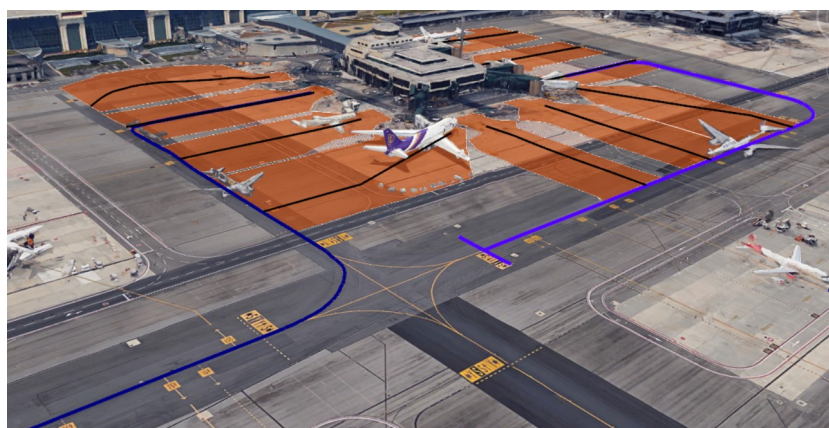


Figura 5.13: Creazione di più itinerari che sfruttano lo stesso percorso. Il velivolo con precedenza forza il velivolo successivo ad uno stop.

degli aeromobili per il risparmio di carburante, evitando frenate e stop. In condizioni di ora di punta, dove il tempo assume un valore molto superiore anche in virtù delle ripercussioni sugli aeromobili successivi, il controllore può movimentare più velivoli contemporaneamente con l'idea di ottimizzare al massimo la capacità del sistema di circolazione a terra.

Il meccanismo di arresto in prossimità dell'intersezione è totalmente automatico, in virtù della configurazione che assume il sistema al momento del bloccamento degli enti.

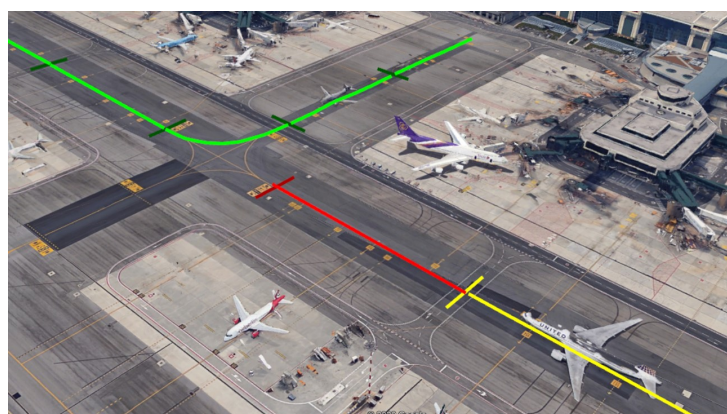
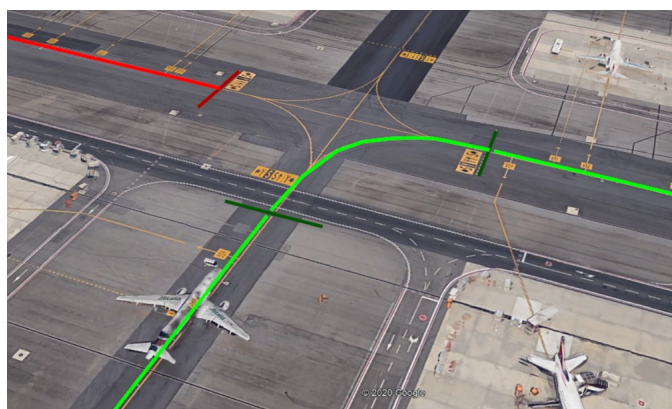


Figura 5.14: Configurazione automatica delle sezioni per le precedenze agli incroci.

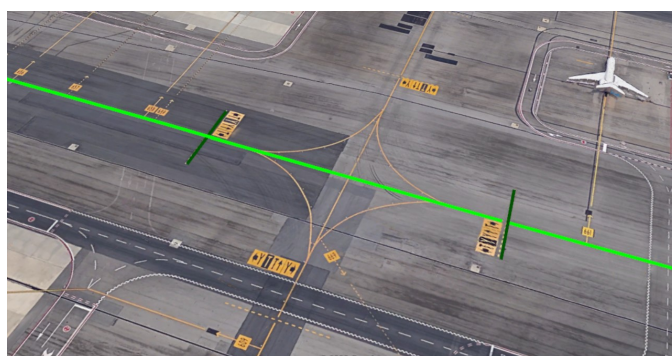
5.3.4 Manovra degli elementi

Una volta che il sistema abbia ricevuto l'input che vuole la partenza dell'aeromobile, e conoscendo il percorso a lui assegnato, il sistema si occupa di configurare le luci sulla pista di modo da guidare l'aeromobile alla posizione desiderata.

La manovra delle indicazioni luminose nei pressi delle intersezioni permette al meccanismo di Guidance di proteggere l'intersezione dall'intrusione di altri veicoli, che vengono preventivamente bloccati dalle stop-bar riportate in Figura 5.9.



(a) Configurazione di Svolta a Dx



(b) Configurazione per procedere dritto

Figura 5.15: Configurazioni di Intersezioni Tipo. La manovra degli Enti comporta lo spegnimento delle luci non necessarie per la visualizzazione corretta del percorso.

5.3.5 Verifica di configurazione degli enti

La manovra degli elementi del sistema è seguita da un meccanismo interno di controllo della configurazione desiderata. In questa maniera viene scongiurata l'ipotesi di un errore tra il segnale di disposizione delle luci e l'effettiva effettuazione del comando.

5.3.6 Bloccamento degli enti

Una volta aver configurato in maniera univoca il percorso assegnato ad un aeromobile, questo percorso viene bloccato fino al passaggio dello stesso. Il software riconosce tramite i dati derivanti dal sistema di osservazione il passaggio del veicolo previsto.

Fino a quanto questo non avviene, come spiegato al Paragrafo 5.3.3, il sistema notificherà al controllore l'impossibilità di usufruire di quel determinato percorso fino ad avvenuto passaggio.

In questo momento il percorso risulta univocamente determinato per ogni aeromobile e dunque quest'ultimo può abbandonare la piazzola di sosta per dare il via alle procedure di decollo.

5.3.7 Apertura del segnale di manovra

Il segnale di manovra viene aperto tramite la tecnologia A-VGDS, abbondantemente descritta ai paragrafi precedenti. Questa tecnologia, a seconda del tipo di piazzola di sosta in cui l'aeromobile è situato (Push-Back o Self-Manouvering), autorizzerà il pilota al movimento.

A seconda della scelta operata dal controllore al momento della creazione dell'itinerario, questo potrà presentare tratti in cui l'aeromobile si debba fermare per lasciar passare un altro velivolo con diritto di precedenza.

In questo caso, il sistema non cambierà la configurazione del Visual Docking system, mostrando sempre la Runway di partenza, ma modificherà la configurazione delle luci di taxiway per prescrivere cambi di itinerario o eventuali stop.

La scelta di un percorso con precedenza non incide sull'itinerario del percorso stesso, ma semplicemente lo "spezza" e lo subordina al completamento di un percorso che gode di diritto di precedenza su di esso.

5.3.8 Liberazione elastica dell'instradamento

Nell'ottica della gestione delle precedenza, si implementa quindi il meccanismo di liberazione elastica dell'instradamento. Il bloccamento degli enti è automatico al momento della determinazione del passaggio di un determinato aeromobile.

Al suo effettivo passaggio, non ha più senso mantenere la sezione percorsa occupata, piuttosto che utilizzarla per il movimento di altri aeromobili. In questa maniera, si descrive un meccanismo di sblocco delle sezioni percorse che, se integrato con il sistema a precedenza, permette ad aeromobili con traiettorie in conflitto di risolvere la loro intersezione per via delle precedenza e successivamente incolonnarsi verso la zona di decollo.

Nella Figura sottostante, si nota come il meccanismo di precedenza rappresentato in Figura 5.14 si sviluppa in un meccanismo di incolonnamento una volta risolto il conflitto.

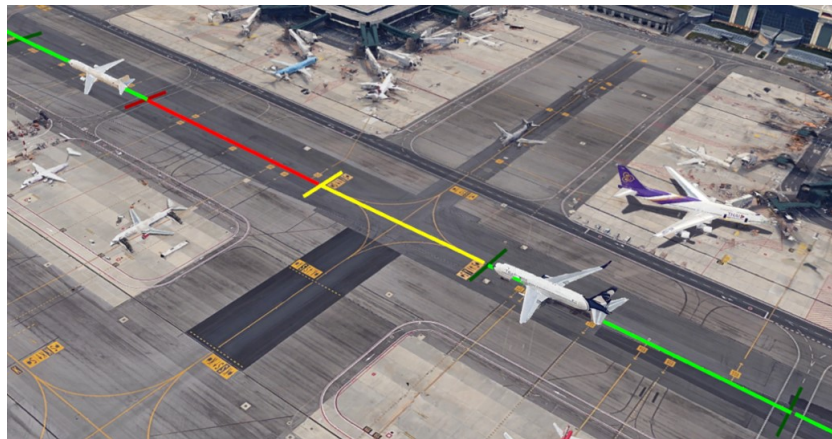


Figura 5.16: Configurazione delle sezioni una volta aver risolto il conflitto in intersezione

In questa maniera il controllore di volo dispone di un sistema di Routing che genera l'instradamento, che può essere sempre modificato dal controllore stesso, e che ne verifica tutti gli standard di sicurezza prima di essere effettivamente formato. Tramite considerazioni sul bloccamento dei percorsi e generando itinerari "spezzati" per garantire la sicurezza delle intersezioni, questo sistema impedisce la sovrapposizione di altri instradamenti e l'incrocio di traiettorie.

Il controllore dispone quindi tramite la sua HMI (vedi Capitolo 7) di una consapevolezza completa di ciò che sta accadendo in pista ed è dunque in grado di intervenire nel caso in cui il sistema segnali che le prescrizioni non siano state rispettate o che rilevi un possibilità di incidente.

Evitando le classiche procedure di comunicazione e di gestione delle intersezioni e delle precedenze il sistema ottimizza il tempo di trasmissione delle informazioni ottimizzando i distanziamenti, sgravando il carico di lavoro del controllore e incrementando la sua visione d'insieme dei movimenti aeroportuali.

5.3.9 Funzionamento per conflitti con voli in taxi-in

La procedura finora considerata tiene in considerazione i conflitti derivanti da due aeromobili che vengono instradati sulla stessa traiettoria in direzione di decollo. Il ragionamento è estendibile al caso in cui uno dei due aeromobili sia appena atterrato e dunque in procinto di raggiungere una piazzola di sosta.

La differenza più marcata riguarda la conflittualità nel senso di marcia degli aeromobili, che dunque genera conflitti di tipo diverso.

Tuttavia, la configurazione del sistema è estendibile anche a questo caso. Il controllore, ricevendo i dati dell'aeromobile in atterraggio, assegna un itinerario allo stesso. Questo itinerario viene creato con la procedura appena descritta, considerando anche eventuali conflitti e precedenze da adottare. Il meccanismo di creazione, verifica ed assegnazione degli itinerari è lo stesso e garantisce la creazione di un itinerario il momento in cui l'aeromobile esce dalla Runway e si avvicina al sistema di circolazione a terra.

Vale comunque la pena considerare che la particolare configurazione dei sensi di percorrenza delle taxiway non causa ingenti code in entrata nei piazzali in quanto divide le taxiway di entrata da quelle di uscita, come evidenziato nel Paragrafo 4.4. Inoltre, la frequenza di atterraggio massima è data dalla frequenza massima di movimenti aerei per ogni pista. In linea pratica, i flussi non sono abbastanza ingenti da creare problematiche di code per gli aeromobili in arrivo.

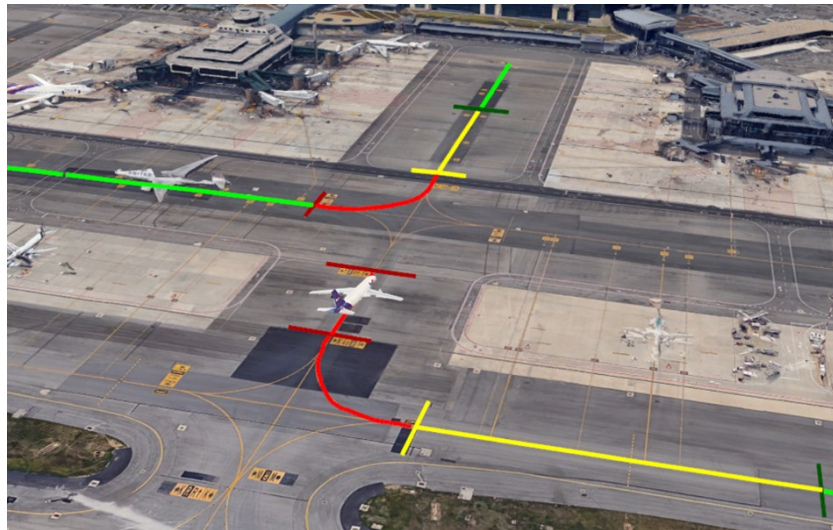


Figura 5.17: Gestione Conflitto con un Aeromobile in Entrata

5.4 Sicurezza

La configurazione di sistema di circolazione appena enunciata provvede anche alle verifiche di sicurezza necessarie al corretto svolgimento delle operazioni aeroportuali. Considerando la struttura qui enunciata e descritta, è di nostro interesse comprendere come le funzioni del sistema A-SMGCS a blocchi siano riconducibili ai concetti normativi espressi nel Paragrafo 2.3.2.

RMCA

La funzione di Runway Monitoring and Conflict Alerting viene assolta tramite il meccanismo di stop bar che è già in uso. Per definizione, la zona di circolazione in stazione non presenta particolari contatti con la RPA, di conseguenza l'operazione di protezione della Runway si limita alla presenza delle stop bar già esistenti.



Figura 5.18: StopBars Esistenti, Funzione RMCA

CATCC

La funzione principale del sistema è quella di fornire al controllore di volo uno schema di supporto decisionale. In quest'ottica è evidente come la funzione principale dell'algoritmo di creazione dei percorsi, che è la segnalazione e la focalizzazione sulle traiettorie conflittuali per la decisione delle precedenze

(Paragrafo 5.3.3) si inquadri nell'ambito del CATCC.

Richiamando la funzione del Conflicting ATC Clearances di verificare la compatibilità delle clearance date dai controllori rispetto ad eventuali conflitti, il sistema si propone di evidenziare conflitti e risolverli tramite i dati raccolti in tempo reale dalla superficie aeroportuale e mostrati nell'interfaccia unica. In questo modo, non solo si opera una verifica di sicurezza sull'operato del controllore ma si mette anche lo stesso nella condizione di rimediare rapidamente ad un suo errore, visualizzando un'allerta sul suo stesso schermo.

CMAC

La funzione CMAC è strettamente legata alla possibilità di prevedere eventuali conflitti all'interno dello spazio designato.

Il sistema, tramite la conformazione delle sezioni e delle intersezioni, assieme al concetto di bloccamento degli enti espresso al Paragrafo 5.3.6, è in grado di stabilire una zona di sicurezza attorno ad un aeromobile. Questa zona di sicurezza è rappresentata dalle sezioni stesse, che presentando un colore diverso prescrivono agli aeromobili vicini di non superare le corrispondenti stop bar.

La generazione di un'allerta di tipo 1 (Paragrafo 2.3.2) è il primo step per la definizione di un pericolo e viene emesso al superamento di una stop bar gialla.

Il segnale di allerta 1, sebbene non rappresenti un pericolo immediato, prepara il controllore di volo a prendere una decisione immediata nel caso in cui l'allerta degeneri in un'allerta di tipo 2, evidenziando la necessità di un intervento per scongiurare un incidente.

La funzione di previsione risulta fondamentale per l'implementazione di una tecnologia automatica affidabile, di modo da ridurre i tempi di reazione associati al verificarsi di una situazione pericolosa e potenzialmente ridurre i costi derivanti dalle collisioni (Paragrafo 1.3).

5.5 Considerazioni

Dalla configurazione del sistema di circolazione in linea si giunge alle seguenti considerazioni più rilevanti:

- Lo schema di funzionamento a blocchi assolve ai principali requisiti di sicurezza descritti dalle funzioni RMCA e CMAC,
- Il meccanismo di creazione dell'itinerario permette la verifica e l'implementazione della procedura CATCC,
- Le intersezioni e i relativi conflitti, sia in taxi-in che in taxi-out sono gestiti autonomamente nel rispetto del distanziamento minimo,
- La liberazione elastica dell'itinerario si configura come aspetto fondamentale della circolazione in condizioni di traffico intenso,
- La configurazione HMI permette al controllore di volo di ottimizzare il processo decisionale. Tuttavia, per procedere ad una migliore organizzazione delle partenze si valuterà la possibilità di introduzione di una stima del tempo di taxiway totale. Conoscendo il tempo atteso di arrivo all'holding point, il controllore potrebbe ottimizzare la successione delle partenze per ottimizzare di conseguenza le precedenze,
- La lunghezza delle sezioni necessita di un calcolo più rigoroso, basato su una stima in-situ del tempo di reazione dei controllori di volo,

Nonostante questo, la vulnerabilità determinata dal mancato rispetto delle prescrizioni di volo da parte del pilota può ancora determinare conseguenze gravi per la circolazione aerea. La risoluzione di questa problematica si basa sul concetto di integrazione tra sistemi di sicurezza e i velivoli, al momento non percorribile.

In futuro, la cooperazione dei sistemi di bordo con quelli di circolazione a terra potrebbe portare alla risoluzione di questa vulnerabilità. Il sistema configurato per questa tesi riduce i rischi associati a questa vulnerabilità ma non la elimina del tutto.

Capitolo 6

La circolazione “in linea”

In accordo con la settorializzazione delle aree operata al Capitolo 4.4, la principale attività del sistema descritto in questo capitolo è quella di prescrivere e verificare le indicazioni di distanziamento longitudinale tra gli aeromobili e l'eventuale entrata in zone proibite.

Per la particolare conformazione del layout aeroportuale, il sistema si pone come obiettivo la Guidance automatica anche in situazioni di intersezione.

La divisione in sezioni permette al sistema di generare indicazioni che riescano a guidare gli aerei ai punti attesa senza contare sul supporto della torre di controllo, evitando il sovraccarico di lavoro in ora di punta.

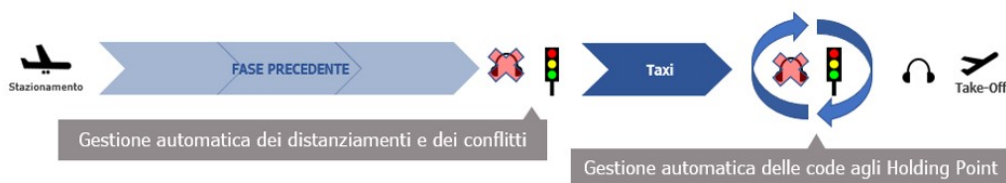


Figura 6.1: Innovazione introdotta nel processo di comunicazione nella circolazione SATR

Successivamente alla configurazione delle sezioni e al funzionamento della procedura di Guidance, è illustrato nel dettaglio il programma di simulazione per l'Active Routing. Si descriverà il processo di generazione delle prescrizioni in tempo reale della velocità ottima da tenere in corrispondenza delle diverse sezioni, così da ottimizzare alcuni dei parametri fondamentali come i consumi o le emissioni di CO, HC e NOx.

6.1 Configurazione e Layout della soluzione

Lo studio da cui si ispira la configurazione in linea è stato sviluppato nel 2013 all'aeroporto Milano Linate dall'azienda P.R.C. Elettronica S.r.l. [32]. In collaborazione con SEA, si è sviluppato un sistema a blocchi non-virtuali, quindi dotati di stop-bar fisiche, che risolvesse il problema della capacità in condizioni di visibilità ridotta e che potesse verificare le prescrizioni di marcia ed eventuali violazioni fornendo un sistema di Guidance e controllo automatico di circolazione.

Sulla base di test effettuati in sito, con l'ausilio di veicoli e velivoli precedentemente informati, si è andato a valutare il miglioramento generale delle prestazioni, ottenendo i seguenti risultati:

- In condizioni di bassa capacità, un miglioramento del taxi Time e della velocità media trascurabili.
- In condizioni di capacità medio-alta, con formazione di code, un miglioramento del 19,5% del Taxi Time

Rispetto al normale esercizio aeroportuale.

È chiaro come il risultato ottenuto, che aveva come obiettivo di aumentare la capacità in LVP, comporta un notevole aumento di capacità e riduzione del taxi time anche per situazioni di esercizio in CAT I.

Il meccanismo proposto in questa tesi si basa sul principio delle sezioni di blocco per la determinazione di un meccanismo di Automatic Guidance. Per effetto del layout più complesso dell'aeroporto di Milano Malpensa rispetto a Milano Linate, la configurazione di esercizio deve provvedere anche ad un sistema di previsione e risoluzione automatica dei conflitti, dove i flussi in arrivo agli Holding Points delle Runway 35R e 35L si intersecano per creare le code in entrata.

La circolazione in linea sarà dunque divisa in due trattazioni separate:

- Marcia in rettilineo
- Marcia nelle aree di intersezione

Anche per questo sistema saranno definite le 3 funzioni enunciate nel Paragrafo 2.3.2 RMCA, CATCC, CMAC, andando ad integrare le tecnologie già messe in opera e citate in Appendice A.2 [16].

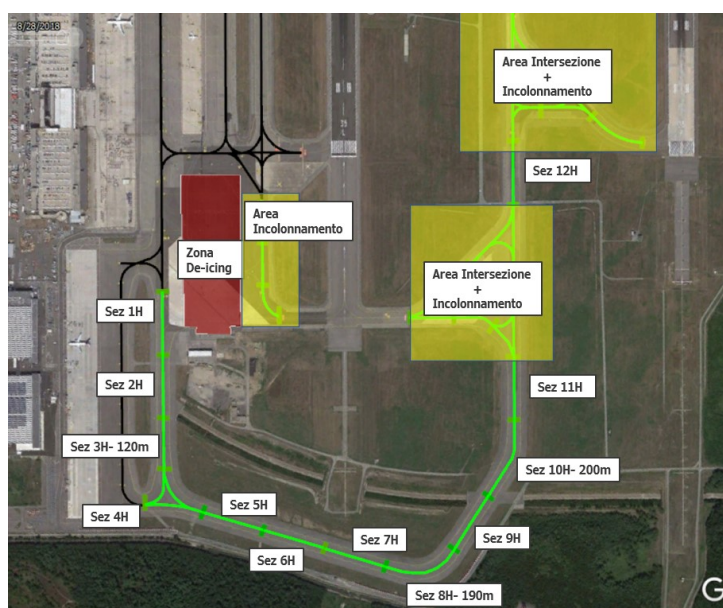


Figura 6.2: Configurazione delle sezioni per la zona sud dell'aeroporto. Le lunghezze non riportate sono quelle standard, 150m.

N° Sez	Lunghezza (m)
Sez 1H	150
Sez 2H	150
Sez 3H	120
Sez 4H	150
Sez 5H	150
Sez 6H	150
Sez 7H	150
Sez 8H	190
Sez 9H	150
Sez 10H	200
Sez 11H	150
Sez 12H	150

Tabella 6.1: Tabella delle lunghezze delle sezioni per la circolazione sul raccordo HOTEL.

La lunghezza delle sezioni minima risulta di 150m in Taxiway e di 100m in corrispondenza degli Holding Point. L'unica sezione con lunghezza pari a 120m, frutto del layout aeroportuale, può essere concatenata con le successive allo scopo di ottenere il distanziamento corretto. Come enunciato al Paragrafo 5.1, la lunghezza è stata ricavata da dati cinematici generalizzati per un aereo standard di categoria F. La lunghezza delle sezioni di attesa della Clearance per il decollo è stata definita in base agli holding point già presenti in pista.

È riportata in Figura 6.2 la configurazione generale del sistema di circolazione in linea e di gestione delle code. Considerando la lunghezza minima, queste sono state adattate al layout aeroportuale.

In colori diversi sono riportate le sezioni standard di incolonnamento, dove in caso di congestione si fermano gli aeromobili in attesa della Clearance per il decollo.

Per gli ingressi considerati l'ultima sezione prima della Runway è riferita all'holding point in CAT I e II. Per la CAT III l'holding point è il precedente. In questa maniera il sistema è facilmente adattabile alle procedure in bassa visibilità.

N° Sez	Lunghezza (m)
Sez 1C	190
Sez 2C	190
Sez 3C	150
Sez 4C	150
Sez 5C	150
Sez 6C	150
Sez 7C	150
Sez 8C	190
Sez 9C	150
Sez 10C	200
Sez 11C	150
Sez 12C	150
Sez 13C	150

Tabella 6.2: Tabella delle lunghezze delle sezioni per la circolazione sul raccordo CHARLIE.

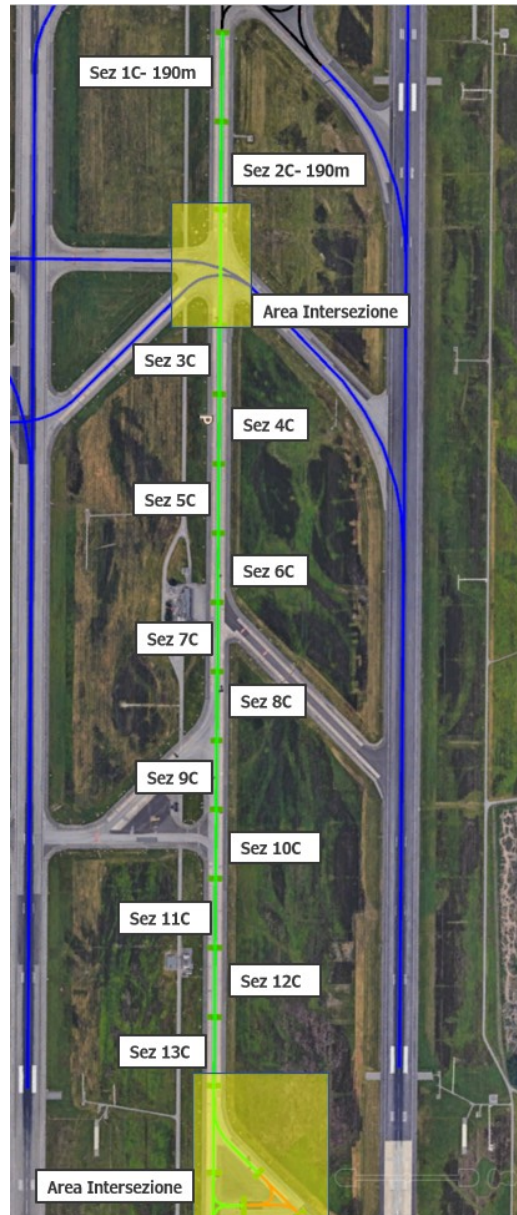


Figura 6.3: Lunghezze delle sezioni per il raccordo Charlie. Le lunghezze non riportate sono quelle standard, 150m. L'area di intersezione in alto è generata dal conflitto con i flussi atterranti sulla 35R e diretti al T1. L'area di intersezione in basso è quella relativa alla Runway 35R

6.1.1 Entrata in Runway 35L

Entrata da Taxiway Hotel o Charlie

L'entrata nella Runway 35L è caratterizzata da una serie di sezioni volte ad accogliere l'incolonnamento degli aeromobili e a gestire i conflitti di intersezione dei velivoli provenienti da Terminal diversi. Il layout è qui presentato, assieme alla tabella che rappresenta le lunghezze dei singoli raccordi. La diminuzione delle velocità in prossimità del raggiungimento della Runway ed il vincolo di velocità massima di 10 Nodi in corrispondenza delle curve permette di diminuire la lunghezza delle sezioni al valore di 100 m.

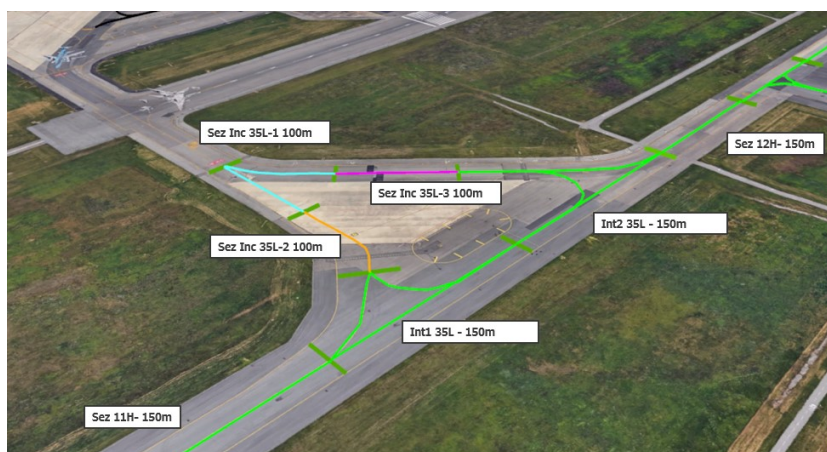


Figura 6.4: Schema di organizzazione delle sezioni in corrispondenza dell'ingresso Sud-Ovest della Runway 35L

N° Sez	Lunghezza (m)
Sez Int1 35L	150
Sez Int1 35L	150
Sez Inc 35L-1	100
Sez Inc 35L-1	100
Sez Inc 35L-1	100

Tabella 6.3: Tabella di riepilogo della lunghezza delle sezioni per l'intersezione in Figura 7.3.

In questa maniera, il sistema accoglie fino a 3 aeromobili in attesa senza disturbare la circolazione sulle taxiway adiacenti.

Entrata da Taxiway Whisky o Kilo

L'ingresso Est della Runway 35L è situato in prossimità della zona di de-icing. L'interazione con questa procedura è lasciata a futuri sviluppi. Il layout della soluzione presenta 3 sezioni di incolonnamento.

Esattamente come l'entrata est, la lunghezza delle sezioni è progettata per mantenere una velocità di crociera di 10 nodi, ottimizzando il numero massimo di aeromobili in coda.

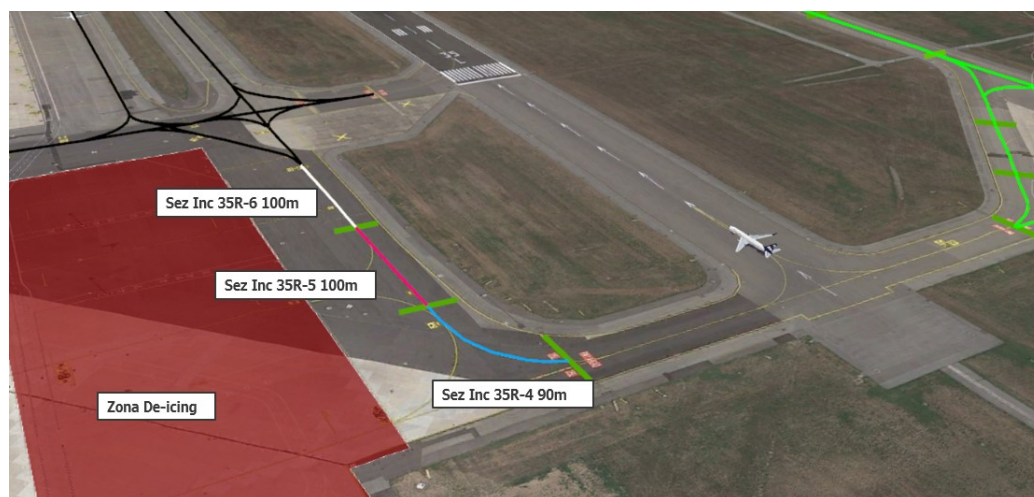


Figura 6.5: Schema di organizzazione delle sezioni in corrispondenza dell'ingresso Sud-Est della Runway 35L

N° Sez	Lunghezza (m)
Sez Inc 35L-4	90
Sez Inc 35L-5	100
Sez Inc 35L-6	100

Tabella 6.4: Tabella di riepilogo della lunghezza delle sezioni per la zona di incolonnamento Runway 35L in Figura 7.4.

6.1.2 Ingresso in Runway 35R

L'ingresso nella Runway 35R è invece regolato da un sistema formato da due sezioni di incolonnamento. Vista la percorrenza monodirezionale del raccordo Charlie, al terzo aeromobile l'incolonnamento può svilupparsi sulla taxiway stessa influenzando parzialmente sull'efficienza dei flussi di traffico interni all'aeroporto.

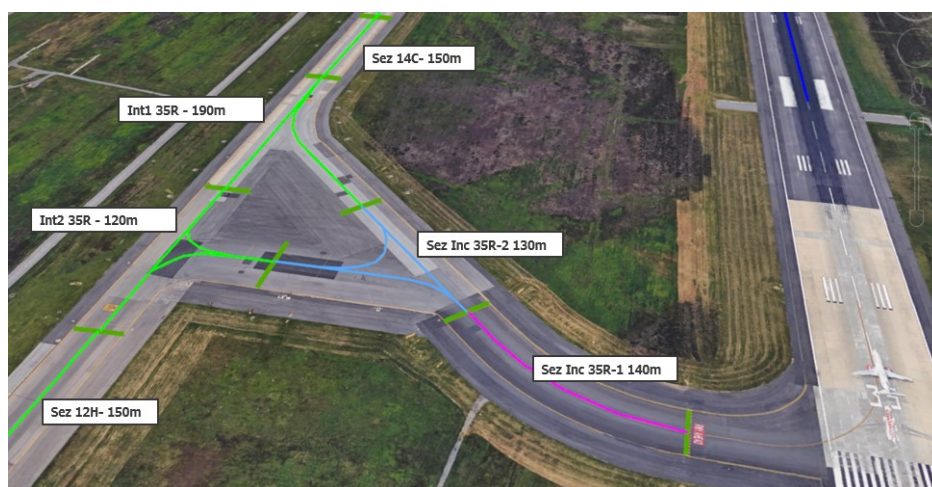


Figura 6.6: Schema di organizzazione delle sezioni in corrispondenza dell'ingresso Sud-Est della Runway 35R

N° Sez	Lunghezza (m)
Sez Int1 35R	190
Sez Int2 35R	120
Sez Int 35R-1	130
Sez Int 35R-2	140

Tabella 6.5: Tabella di riepilogo della lunghezza delle sezioni per la zona di incolonnamento Runway 35R

6.1.3 Taxiway link Charlie - Delta

Vale la pena sottolineare il layout dell'intersezione tra la SATR in uscita dalla Runway 35R e diretta al Terminal 1 e la Taxiway charlie. In prossimità

dell'intersezione, il sistema a blocchi presenta una lunghezza maggiore per accomodare con margini di sicurezza più ampi i rischi derivanti dalle elevate velocità di percorrenza e dai flussi conflittuali.

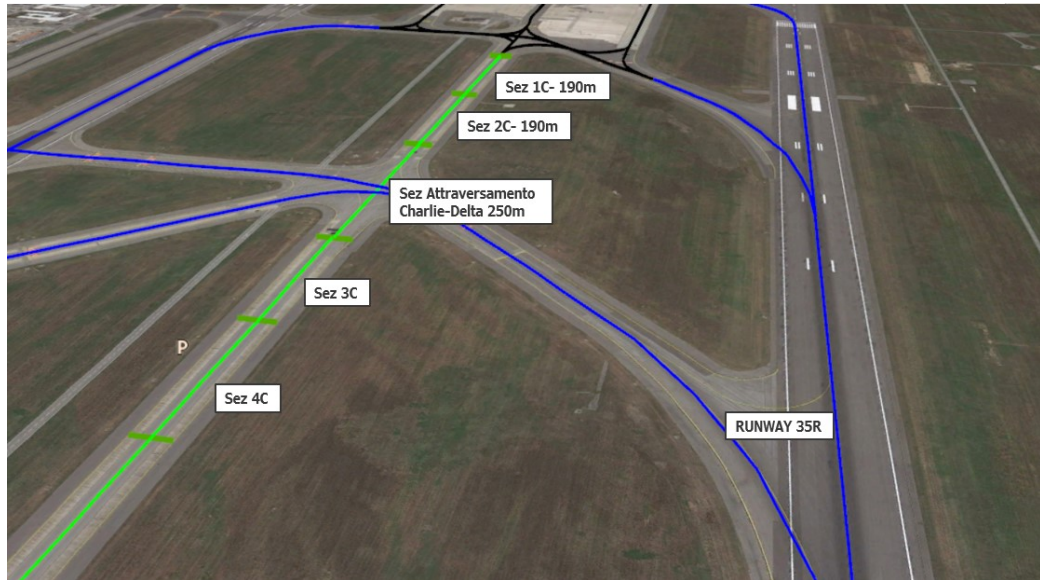


Figura 6.7: Schema di organizzazione delle sezioni in corrispondenza dell'uscita della Runway 35R

N° Sez	Lunghezza (m)
Sez Attraversamento Charlie-Delta	250

Tabella 6.6: Tabella di riepilogo della lunghezza delle sezioni per la zona di attraversamento charlie delta

6.2 Funzionamento del sistema in rettilineo

Il sistema in rettilineo è applicabile all'inserimento iniziale nelle taxiway Hotel e Charlie, quando il flusso di traffico è ancora monodirezionale.

Sfruttando il parallelo con la circolazione ferroviaria come espresso nel Paragrafo 4.4, le sezioni di blocco sono costruite per rappresentare in maniera automatica le prescrizioni di marcia tramite segnali luminosi.

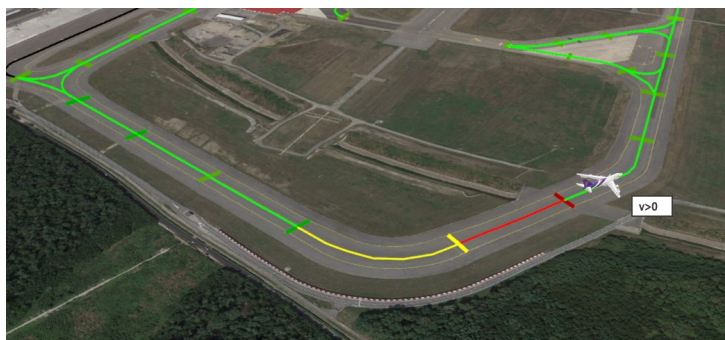


Figura 6.8: Aereo indisturbato in circolazione

Nello schema con aereo indisturbato in circolazione (6.8), è chiaro come la disposizione delle sezioni prevede una distanza dell'aereo che segue che permette all'aereo successivo una frenata in sicurezza. La disposizione delle stop bar permette di rilevare eventuali violazioni delle prescrizioni di marcia. L'aereo qui rappresentato trova di fronte a sé una segnaletica rappresentante il via libera, a segno che le successive sezioni di taxiway non sono correntemente occupate.

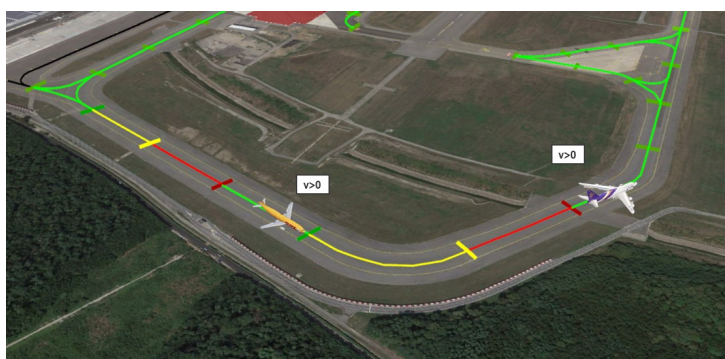


Figura 6.9: Aerei in Circolazione a distanza maggiore di due sezioni di blocco

La circolazione di più aerei sulla stessa taxiway (6.9) comporta il mantenimento della distanza di sicurezza minima. Da questo si nota che per due

aerei in circolazione con distanza superiore a quella di due sezioni di blocco, la marcia risulta indisturbata in quanto i due aeroplani avranno di fronte a se segnali di via libera.

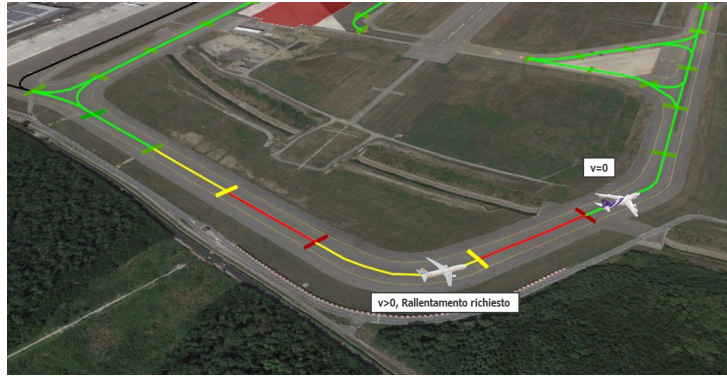


Figura 6.10: Aerei in Circolazione con distanza minore di due sezioni di blocco

Nel caso in cui la distanza scenda al di sotto di due sezioni di blocco (6.10), per effetto ad esempio di una frenata dell'aereo che precede, il sistema reagisce mostrando la segnaletica di avviso di via impedita al velivolo che segue, che di conseguenza rallenta per evitare il tamponamento. Questa procedura si rifà alla prontezza del pilota e alla sua interpretazione della segnaletica luminosa. In condizioni di visibilità 1 il procedimento di distanziamento viene tenuto dai piloti tramite verifica visiva, ma in condizioni di bassa visibilità l'intervento della Guidance automatica è fondamentale per avvisare i piloti di un potenziale pericolo.

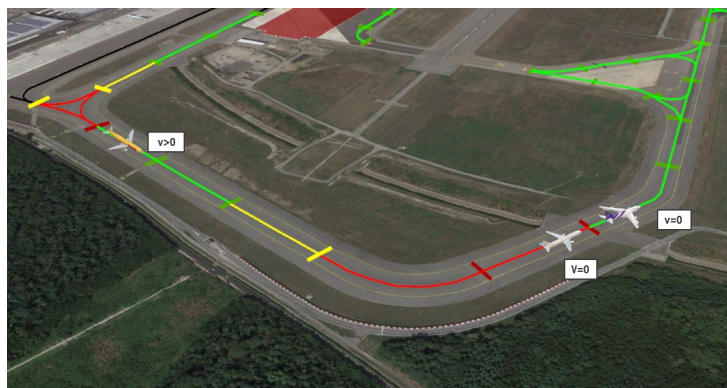


Figura 6.11: Aerei incolonnati

Nel caso in cui l'aereo che precede fosse costretto a fermarsi (6.11), si genererebbe una condizione di incolonnamento. La capacità del sistema in

rettilineo di gestire automaticamente le prescrizioni di marcia permette al sistema di reagire dinamicamente alla ripartenza del primo aeromobile e rimettere in moto l'intero sistema senza l'intervento del controllore di volo sulla movimentazione di ognuno degli aeromobili.

6.2.1 Sorveglianza

L'identificazione dell'aeromobile passa attraverso la rilevazione della presenza del velivolo con barriere a microonde. L'identità del velivolo è fornita dal sistema A-CDM (Paragrafo A.5), che dispone delle informazioni necessarie al momento della partenza. Le barriere a microonde rilevano il passaggio del velivolo attraverso predefinite sezioni trasversali. Il sistema di osservazione rileva inoltre la velocità puntuale del velivolo, di modo da poter applicare gli algoritmi di ottimizzazione descritti nei paragrafi successivi.

L'aeroporto di Milano Malpensa, come analizzato nel Paragrafo A.1 è provvisto di un Surface Movement Radar (SMR) e si doterà dei Transponder T per il monitoraggio in tempo reale dei veicoli di servizio sulla pista di rullaggio.



Figura 6.12: Schermata di sorveglianza SMR Aeroporto di Schiphol, Amsterdam

Il Surface Movement Radar permette ai controllori di volo di disporre della posizione in tempo reale degli aeromobili in qualsiasi condizione di visi-

bilità, con un rateo di aggiornamento di circa 1s e una precisione dell'ordine dei 7.5m [44].

Esso associa ad ogni aereo in movimento sul piazzale un'etichetta che ne specifica il numero di volo e quindi determina univocamente il modello di velivolo in circolazione. È inefficace nel valutare le velocità puntuali e dunque si richiede l'adozione di una tecnologia complementare.

La tecnologia proposta da Marchionni [32] nell'implementazione del controllo a blocchi per Milano Linate si basa su un sistema di barriere a microonde in grado di valutare il passaggio, dunque l'occupazione di una sezione e la velocità media all'interno della sezione stessa.

Per le esigenze del caso studio, vengono dunque previste un numero di 4 barriere a microonde per ogni sezione, di modo da disporre di un sufficiente numero di controlli di velocità per l'adozione delle successive strumentazioni di previsione e controllo.

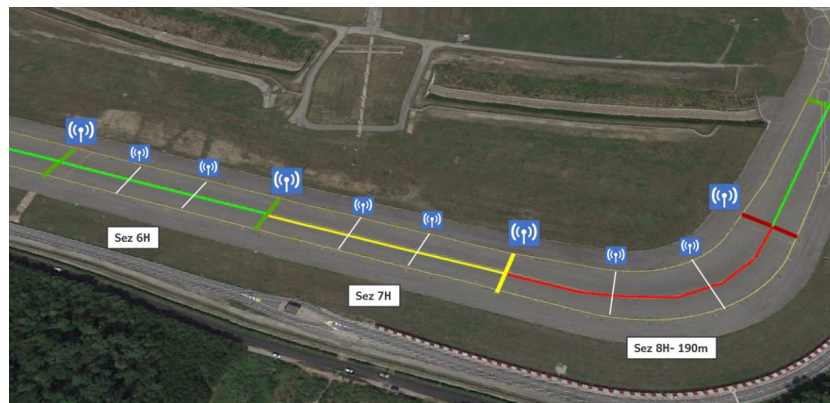


Figura 6.13: Disposizione delle Barriere a Microonde

Per ogni sezione è possibile dunque valutare lo stato di avanzamento dell'aeromobile e generare il relativo profilo di velocità. Future implementazioni di “Collaborative Sensors” sui velivoli o evoluzioni del SMR permetterebbero di monitorare in continuo i valori di velocità giustificando una rimozione del sistema a microonde.

6.2.2 Controllo

Il sistema di controllo si basa sull'implementazione delle tecnologie descritte al Paragrafo 2.3.2 per la generazione delle prescrizioni di marcia. Il sistema elabora le informazioni provenienti dalle barriere a microonde e genera il

profilo di velocità ottimale.

Inoltre, prevede e trasmette l'informazione sull'occupazione delle sezioni seguenti.

I dati derivanti dal sistema di controllo sono dunque elaborati da un sistema informatico che, tramite la creazione del diagramma di trazione evidenzia la possibilità di eventuali collisioni e della violazione delle aree protette.

Diagrammi di Trazione per Aeromobili

La creazione del profilo di velocità per un singolo aeromobile avviene al passaggio delle diverse barriere secondo il seguente schema esemplificativo di un rallentamento prima di una curva.

1. Passaggio per il punto A: Il dispositivo di sorveglianza rileva il passaggio dell'aeromobile e occupa la sezione. Il tempo del passaggio viene registrato

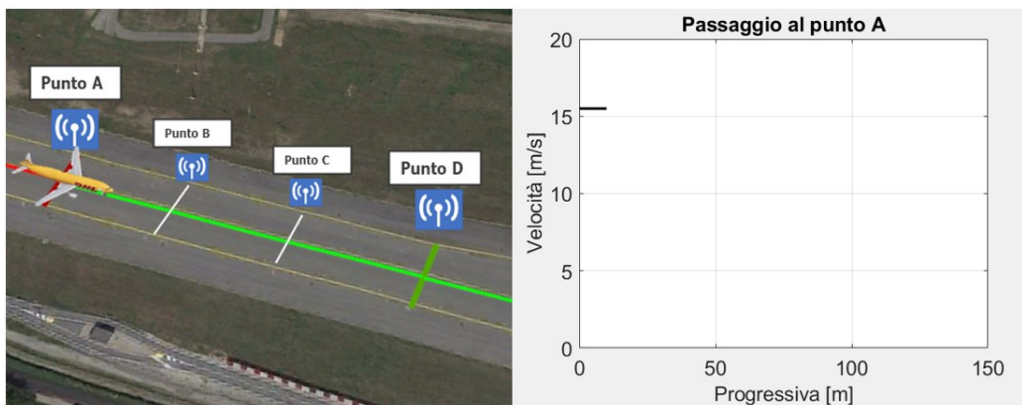


Figura 6.14: Passaggio per il Punto A

2. Taxi tra A e B
3. Passaggio dal punto B: Il dispositivo di sorveglianza rivela il passaggio, disponendo della distanza tra i due punti è dunque in grado di calcolare la velocità media

$$v_{mB}[m/s] = \frac{l_{(A \rightarrow B)}}{(t_B - t_A)} \quad (6.1)$$

4. Taxi tra B e C

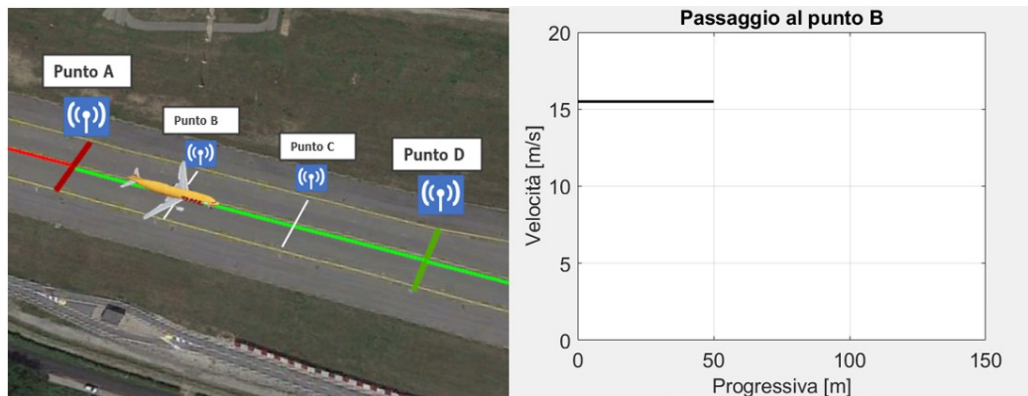


Figura 6.15: Passaggio per il Punto B

5. Passaggio dal punto C: il dispositivo di sorveglianza rileva il passaggio ed aggiorna il valore della velocità media. Calcola anche il valore di accelerazione.

$$v_{mC}[m/s] = \frac{l_{(B \rightarrow C)}}{(t_C - t_B)} \quad (6.2)$$

$$a_{m(B \rightarrow C)}[m/s] = \frac{v_{mc} - v_{mb}}{t_C - t_B}$$

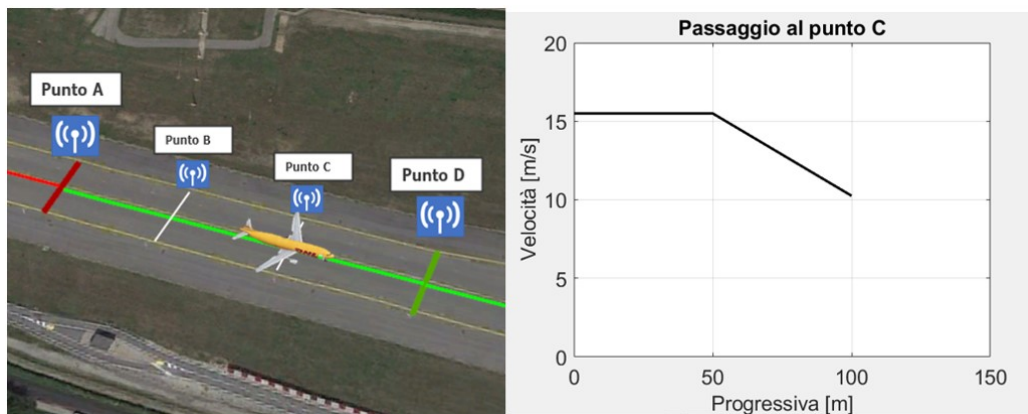


Figura 6.16: Passaggio per il Punto C

In generale, per un aeromobile in taxi su un elemento k , attraversando le sezioni trasversali i e con:

l_k =Lunghezza dell'elemento k

t_i =Tempo rilevato al passaggio della sezione trasversale i rispetto all'inizio del rullaggio

$V_{m(i)}$ =Velocità media sull'elemento k

Si utilizza la seguente espressione per il calcolo della velocità e dell'accelerazione del velivolo.

$$v_{m(i+1)}[m/s] = \frac{l_k}{t_{(i+1)} - t_i} \quad (6.3)$$

$$a_{m(k)}[m/s] = \frac{v_{m(i+1)} - v_{m(i)}}{t_{(i+1)} - t_i}$$

Conoscendo univocamente i parametri di lunghezza delle sezioni, è possibile dunque determinare il profilo di velocità di un aeromobile, o in generale di più aeromobili percorrenti lo stesso raccordo.

In Figura 6.17 e 6.18 sono riportate rispettivamente le costruzioni di un profilo di velocità completo e la rappresentazione di più aeromobili in rullaggio a un determinato istante.

La creazione dei profili di velocità è alla base dei meccanismi di creazione delle curve di sicurezza. La conoscenza delle velocità e dei distanziamenti tra due aeromobili permette, attraverso semplici calcoli di dinamica, di evidenziare la potenzialità di un conflitto imminente.

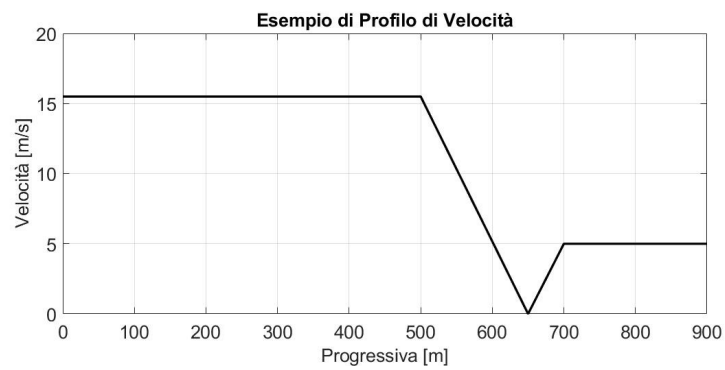
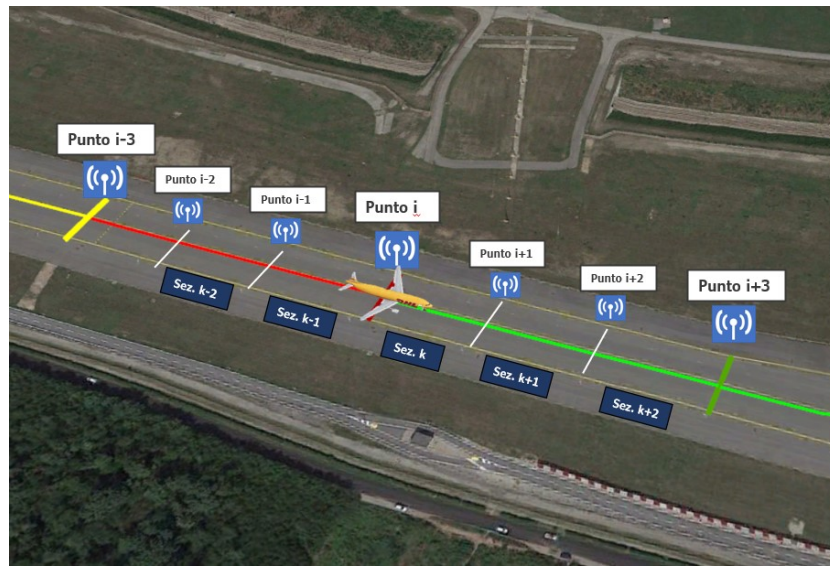


Figura 6.17: Esempio di costruzione dinamica del profilo di velocità

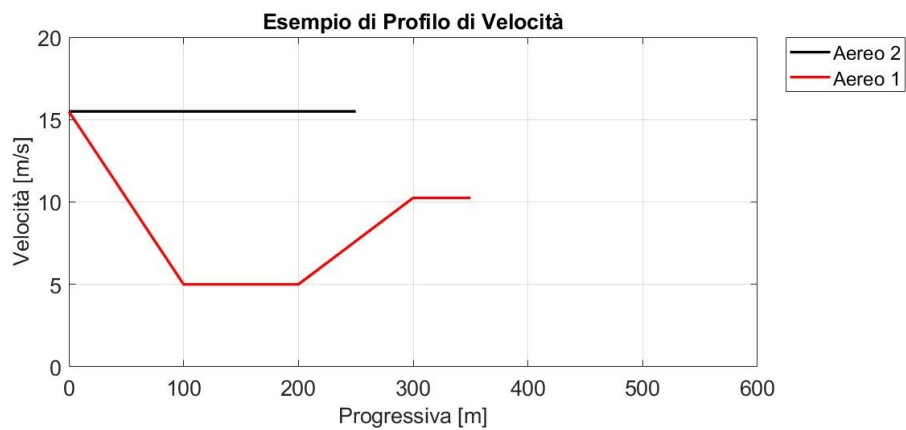


Figura 6.18: Rappresentazione dei profili di velocità di due aeromobili in rullaggio contemporaneamente

Nell'eventualità che un aeromobile sia fermo in pista, considerando l'occupazione delle sezioni, il sistema conosce in anticipo il punto dove il profilo di velocità dell'aeromobile che segue dovrà approssimare lo zero, di modo da non invadere la sezione occupata.

Il sistema è dunque in grado di determinare se la velocità attuale dell'aereo che segue permetta la degradazione della marcia in sicurezza.

La curva di sicurezza è definita come il luogo dei punti all'interno dello spazio del profilo di velocità che, se attraversata, non consente di evitare la collisione con l'ostacolo se non con una frenata di emergenza.

Il sistema di controllo A-SMGCS controlla il rispetto delle prescrizioni luminose verificando istante per istante la concordanza con la curva di sicurezza. Il riscontro di una condizione di pericolo viene prontamente segnalato al controllore di volo che interviene radiofonicamente.

Esse sono dimensionate in funzione dello spazio di arresto d'emergenza, che è così definito:

$$Spazioidiarresto = v_{max} * \tau + \frac{v_{max}^2}{2 * d} \quad (6.4)$$

Con:

v_{max} = velocità massima consentita 15.5m/s

τ = tempo di reazione

d = decelerazione massima, 1m/s²

Il tempo di reazione, già incontrato nella valutazione della lunghezza delle sezioni, è un particolare importante all'interno del processo di creazione delle curve di sicurezza. Viene posto uguale a:

$$\tau = \tau_{ric} + \tau_{tr} + \tau_{reaz.contr.} + \tau_{tr.pil.} + \tau_{reaz.pil.} + \tau_{imp}$$

τ_{ric} = tempo di riconoscimento e generazione dell' allarme da parte del sistema di controllo

τ_{tr} = tempo di trasmissione dell' allarme al controllo ATC

$\tau_{per.contr.}$ =tempo di reazione del controllore di volo

$\tau_{tr.pil.}$ =tempo di trasmissione dell' allarme al pilota

$\tau_{reaz.pil.}$ =tempo di reazione del pilota

τ_{imp} =tempo di azionamento dell' impianto frenante

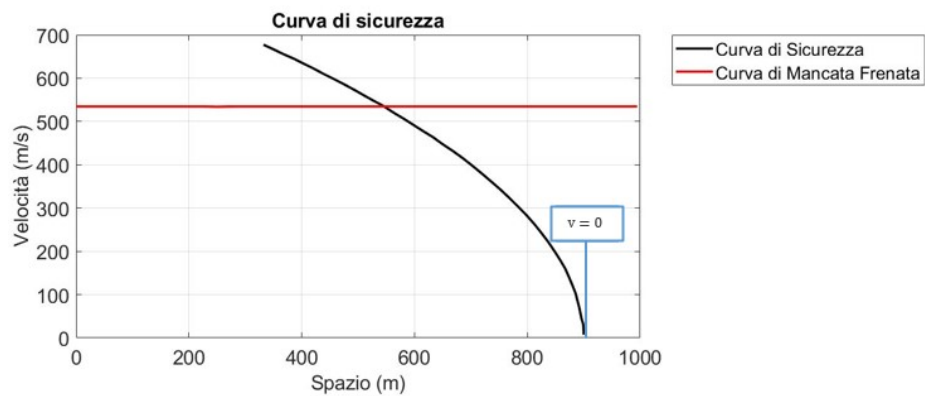


Figura 6.19: Curva di Sicurezza

Dove all'interno del tempo di reazione di ogni controllore umano è considerato l'onere di elaborazione dell'informazione e il processo decisionale.

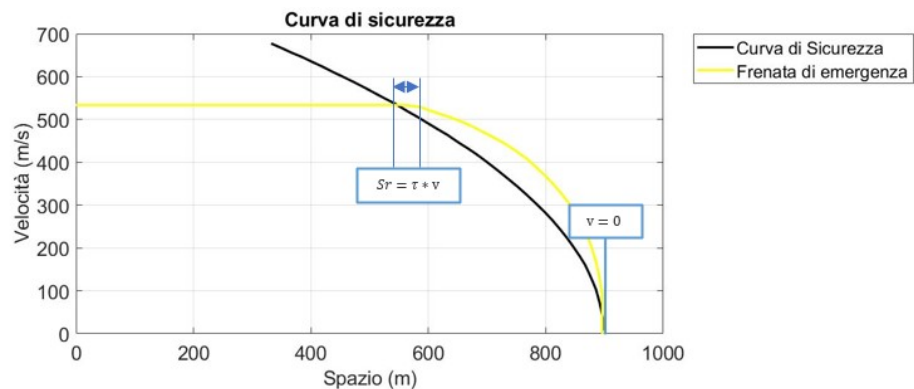


Figura 6.20: Diagramma di Trazione nel Caso di Intersezione con la Curva di Sicurezza

Applicativamente, nel caso in cui si approcci la curva di sicurezza con un valore di velocità che lascia intendere una mancata frenata, si aziona il processo di allarme che porta alla frenatura di emergenza.

Il tempo che intercorre tra l'azionamento dell'allarme e l'effettiva frenata causa un ritardo che influisce negativamente sullo spazio totale di frenata.

Come precedentemente specificato, il lavoro di tesi si propone di fornire una metodologia per il calcolo delle curve di sicurezza, lasciando a futuri sviluppi la stima rigorosa di questo valore tramite sondaggi e prove in-situ. Con riferimento alle considerazioni contenute nel Paragrafo 1.3.4, si evidenzia come l'adozione di un sistema di prevenzione delle collisioni in taxilane è fondamentale per la riduzione del rischio relativo agli incidenti Aereo-Aereo, che al momento contano per il 56% dei costi totali delle collisioni aeroportuali [50].

L'inquadramento normativo delle funzioni assolute dalle curve di sicurezza è studiato al Paragrafo 6.5.

6.2.3 Guidance

L'ICAO definisce le categorie di visibilità fino alla categoria IIIC. Nonostante questo, L'Ente Nazionale Aviazione Civile, nel regolamento per l'esercizio degli aeroporti, descrive le classi fino alla IIIB. Di seguito è allegata una tabella illustrativa delle diverse condizioni di visibilità.

1.6.1 *Operazioni in Categoria I (CAT I):* avvicinamento strumentale di precisione ed atterraggio con:

- a) altezza di decisione (Decision Height - DH) non inferiore a 60 metri (200ft), e
- b) visibilità generale non inferiore a 800 metri o portata visiva di pista (*Runway Visual Range - RVR*) non inferiore a 550 metri.

1.6.2 *Operazioni in Categoria II (CAT II):* avvicinamento strumentale di precisione ed atterraggio con:

- a) DH inferiore a 60 metri (200ft) ma non inferiore a 30 metri (100ft), e
- b) RVR non inferiore a 300 metri.

1.6.3 *Operazioni in Categoria III (CAT III):* sono suddivise come segue:

1.6.3.1 *Operazioni in CAT IIIA:* avvicinamento strumentale di precisione ed atterraggio con:

- a) DH inferiore a 30 metri (100ft) e
- b) RVR non inferiore a 200 metri.

1.6.3.2 *Operazioni in CAT IIIB:* avvicinamento strumentale di precisione ed atterraggio con:

- a) altezza di decisione (DH) inferiore a 15 metri (50ft) o senza altezza di decisione, e
- b) RVR inferiore a 200 metri ma non al di sotto di 75 metri.

Figura 6.21: Categorie di Visibilità Definite dall'ENAC

Si solleva dunque la necessità di provvedere ad un sistema di Guidance che sia in grado di trasmettere le condizioni di occupazione delle sezioni anche in condizioni di visibilità prossime ai 75m.

EQUIPAGGIAMENTI DISPONIBILI	MLAT	SMR ON	SMR OFF	STOP BAR
CONDIZIONI DI VISIBILITÀ 2 Con RVR superiore a 550m	** SI	Informazioni di traffico & Radar monitoring	Informazioni di traffico & Raporti di posizione	ON
CONDIZIONI DI VISIBILITÀ 2 Con RVR compresa tra 550m e 400m (fasce basse)	** SI	MOVIMENTAZIONE A BLOCCHI Gestione tramite IHP/RHP CONTIGUI & Riduzione dello spaziamento longitudinale se l'a/m che segue ha in vista l'a/m che precede.		ON
CONDIZIONE DI VISIBILITÀ 3 RVR* < inferiore 400 m.	** SI	MOVIMENTAZIONE A BLOCCHI Gestione tramite IHP/RHP CONTIGUI & Riduzione dello spaziamento longitudinale se l'a/m che segue ha in vista l'a/m che precede	UN A/M PER VOLTA	ON
CONDIZIONE DI VISIBILITÀ 3 RVR uguale o inferiore a 150 m.	** SI	MOVIMENTAZIONE A BLOCCHI Gestione tramite IHP/RHP CONTIGUI	UN A/M PER VOLTA	ON

* Il valore di RVR di riferimento, per le operazioni in area di manovra è il minore di quelli disponibili.
 ** In assenza del contributo SMR, i dati MLAT possono essere utilizzati per l'identificazione.

Figura 6.22: Condizioni di Visibilità dal Regolamento di Scalo di Milano Malpensa

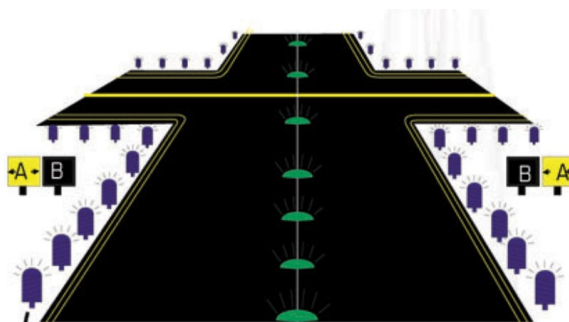


Figura 6.23: Schema di Funzionamento Luci di Taxiway

Citando il regolamento di scalo di Milano Malpensa, riportato in Figura 6.22, si nota come per una condizione di visibilità inferiore ai 400m sia prevista la circolazione in pista di un solo aeromobile per volta.

Il sistema di gestione della circolazione a blocchi conosce la posizione dell'aereo ad ogni passaggio alle barriere a microonde o tramite SMR e può allo stesso tempo guidarlo in maniera automatica alla presentazione agli IHP o RHP (Intermediate Holding Point o Runway Holding Point). La potenzialità dell'adozione di questo sistema è quindi quella di garantire condizioni di traffico generalmente efficienti anche rispetto ai giorni in LVP (Low Visibility Procedures). Perché questo sistema di Guidance funzioni anche al di sotto

della soglia dei 150m di visibilità, e più in generale sia in grado di fornire un contributo che vada ad integrare l'informazione luminosa trasmessa dalle stop bar, si prevede un meccanismo di accensione delle luci di centre line. Come già trattato nel paragrafo 6.2 il colore delle luci riflette la condizione della stop bar successiva, di modo da permettere al pilota di conoscere precedentemente la condizione di occupazione della sezione successiva. Le caratteristiche delle luci devono essere:

1. Colore misto verde, giallo-verde, rosso-verde, così da non confondersi con le luci di Runway
2. Forte visibilità soprattutto in condizioni LVP
3. Un meccanismo di segnalazione dei guasti
4. Per le luci in prossimità dei raccordi direzionali, un circuito di sicurezza che ne garantisca l'alimentazione anche in caso di guasto dell'apparecchio principale.

6.3 Funzionamento Guidance in Intersezione

6.3.1 Rischi e Differenze rispetto alla Circolazione in Rettifilo

Fino ad ora si è seguito un approccio che, tramite le curve di sicurezza, mirava a non far collidere due aerei in rullaggio nella stessa direzione e sulla stessa taxiway.

Questa ipotesi non risulta sempre verificata se si considerano anche le taxiway di intersezione localizzate ai punti attesa delle Runway 35R e 35L o alle intersezioni in uscita dalla pista di volo.

I rischi principali sono connessi alla possibilità di intersezione frontale con flussi provenienti in senso opposto o collisioni trasversali con flussi che attraversano incroci. In merito a questo, è necessario uno strumento che riconosca lo stato di occupazione delle sezioni e che agisca di conseguenza. La configurazione fino ad adesso adottata, basata sulle curve di sicurezza, dovrà essere rivista per poter impedire i conflitti.

6.3.2 Stopbars e Luci di Taxiway Direzionali

Innanzitutto, viene definito il layout caratteristico delle intersezioni. Essendo aree della pista di volo dedicate alla svolta dei veicoli, si ha un disassamento delle linee di centre line e la compresenza di più traiettorie all'interno di una sola sezione. Un particolare di questa configurazione è riportato in Figura 6.24.

Seguendo il principio per il quale la circolazione in linea debba provvedere ad un meccanismo di sorveglianza, controllo e Guidance automatica, è necessario che le zone di intersezione siano in grado di trasmettere l'informazione relativa al percorso da seguire al velivolo stesso.

Inoltre, la compresenza di più linee di centre line è potenziale fattore di sovraccarico, soprattutto per piloti non esperti o non abitualmente frequentanti l'aeroporto.

Sebbene la conoscenza della pista di decollo assegnata al pilota di per sé già garantisce, in condizioni di visibilità ottimale, che il pilota sappia quale percorso seguire, eventualmente aiutato dalla segnaletica di bordo pista, in condizioni di visibilità ridotta il meccanismo di Guidance è in grado di integrare la normale prescrizione garantendo una maggiore sicurezza. Di conseguenza, l'accensione e lo spegnimento delle luci di taxiway riportano le informazioni sul percorso assegnato al velivolo stesso.

Le stop bar, situate a presidio di ogni sezione, garantiscono il via libera per

la percorrenza dell'intersezione. La conoscenza delle svolte che l'aereo dovrà

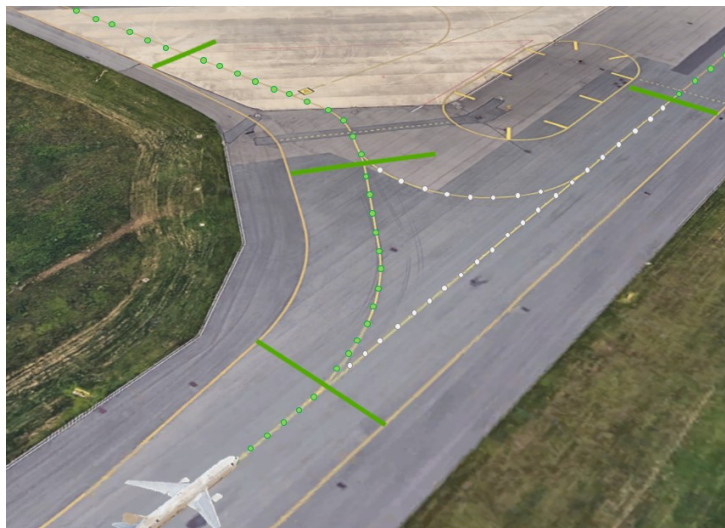


Figura 6.24: Configurazione luci di taxiway per una svolta a sx

effettuare è già presente all'interno del sistema dalla procedura di via libera che viene ordinata dalla torre di controllo quanto l'aereo si trova ancora in piazzola (procedura di Routing).

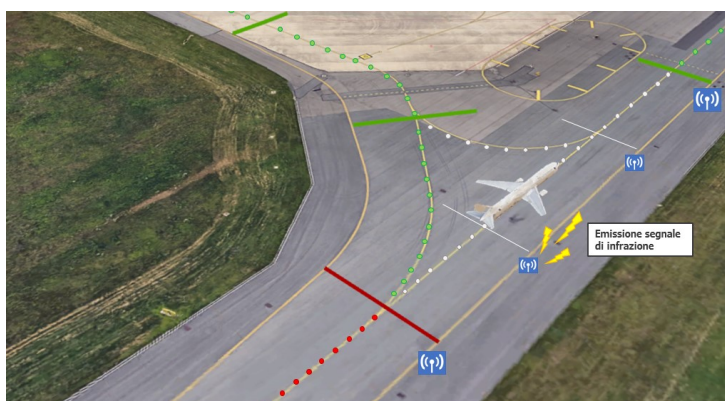


Figura 6.25: Emissione del Segnale di Allarme in Caso di Violazione delle Prescrizioni

Questo aspetto che sarà rivisto successivamente è tuttavia di vitale importanza per il riconoscimento degli errori dei piloti. Il sistema di controllo, tramite la sua conformazione a barriere a microonde, è in grado di confrontare il percorso effettivamente seguito dall'aereo ed ordinare l'intervento del controllore qualora dovesse presentarsi un'infrazione.

6.3.3 Configurazione e Layout della Soluzione per i Decolli 35R e 35L

La configurazione della soluzione per questo tipo di problema è del tutto simile a quella per la costruzione degli instradamenti che invece viene applicata nella circolazione in stazione descritta al Capitolo 5.

Differentemente dalla circolazione in stazione però, dove il blocco di un instradamento si realizza pochi momenti prima del segnale di via libera, impedendo a tutti gli altri instradamenti di aprirsi sulle stesse sezioni interessate, per la circolazione in linea questo causerebbe troppi ritardi. Il principale problema è infatti la lunghezza dei percorsi di decollo.

Se un controllore, decidendo un percorso per un aeromobile dovesse bloccare tutte le sezioni interessate per il tempo necessario al raggiungimento dell’holding point, la capacità ne verrebbe inevitabilmente inficiata.

Si rende dunque necessario provvedere ad un sistema che blocchi in modo dinamico le sezioni, a seconda della vicinanza dell’aeromobile alle intersezioni considerate per permetterne il più possibile la fruizione da parte degli altri aeromobili.

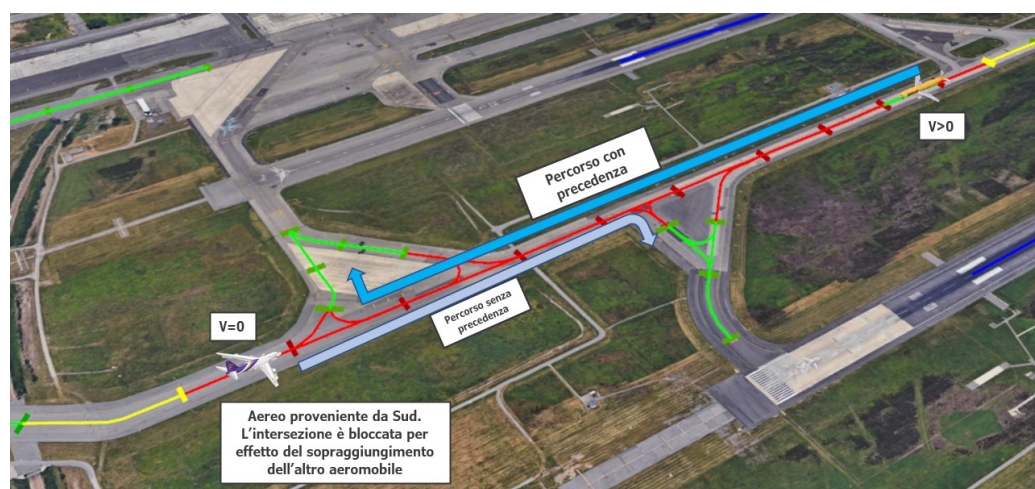


Figura 6.26: Aereo in taxi sul raccordo charlie e diretto alla 35L. Le sezioni, viste da un veicolo che arriva da sud, sono tutte bloccate

Nel sistema descritto per la circolazione nei pressi dell’aerostazione, dove le intersezioni tra traiettorie sono un evento comune, si è disposto della procedura di liberazione elastica dell’instradamento. Questo prevede che il percorso “prenotato” da un veicolo sia liberato, e quindi reso disponibile per la prenotazione successiva, appena venga effettivamente percorso dal veicolo

previsto.

Per risolvere il problema si definisce dunque una procedura di “bloccaggio” elastico dell'instradamento. Esattamente per lo stesso principio per cui l'instradamento viene liberato dopo il passaggio del velivolo, questo verrà bloccato al momento in cui l'aereo in diritto di precedenza si trova a meno di 3 sezioni dall'area di intersezione.

In Figura 6.26 l'aeromobile proveniente da Sud, al quale non viene applicato il principio di precedenza, trova di fronte a sé una serie di sezioni occupate per via del sopraggiungimento dell'aeromobile proveniente da Nord. Al momento dell'entrata nella terza sezione da quella di inizio dell'intersezione, il meccanismo di gestione automatica delle sezioni blocca la zona di intersezione (rappresentata in Figura 6.2) impedendo dunque che questa sia occupata da un altro aeromobile in sopraggiungimento.

In Figura 6.27 è invece rappresentata la configurazione delle sezioni viste nel senso di marcia dell'aereo con precedenza, che grazie alla particolare conformazione della soluzione procede indisturbato con la procedura "Follow the Greens" fino all'holding point assegnato.

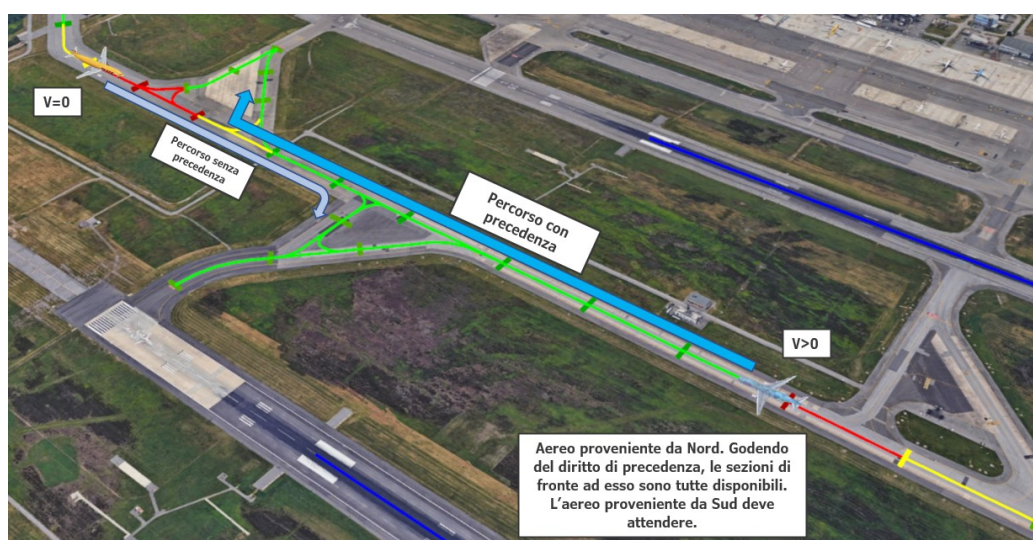


Figura 6.27: Aereo in taxi sul raccordo charlie e diretto alla 35L. Le sezioni, viste da un veicolo che arriva da nord, sono tutte libere.

6.3.4 Configurazione e Layout della Soluzione Per l'Intersezione con l'Uscita ad Alta Velocità dalla 35R

Il sistema di gestione automatica presenta un punto di singolarità in corrispondenza dell'incrocio con la taxiway Delta, dove i velivoli in uscita dalla Runway 35R si dirigono verso il Terminal 1. Una rappresentazione schematica del layout dell'intersezione è rappresentata in Figura 6.7.

In questa particolare configurazione, il sistema di segnalamento si dispone come in Figura 6.28 di modo da accogliere il passaggio dell'aeromobile in atterraggio.

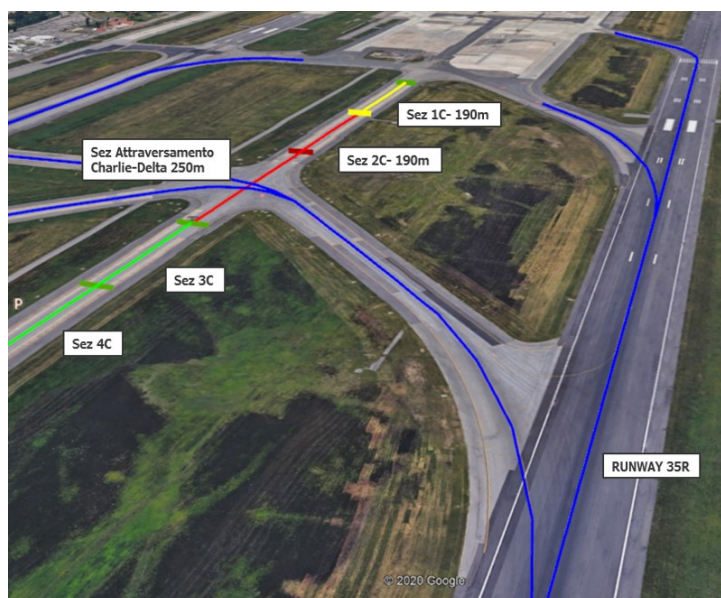


Figura 6.28: Simulazione di situazione di intersezione con l'uscita ad alta velocità dalla Runway 35R

La precedenza è dunque sempre assegnata all'aeromobile che atterra. Al raggiungimento di una determinata altezza, che viene impostata e decisa dai controllori di volo in funzione dei principali parametri dello spazio aereo e che non viene trattata in questa sede, le sezioni 1C e 2C vengono impostate per avvisare della chiusura della sezione di attraversamento, impedendo eventuali conflitti. Il controllo automatico delle curve di sicurezza garantisce possibilità di intervento da parte del controllore di volo.

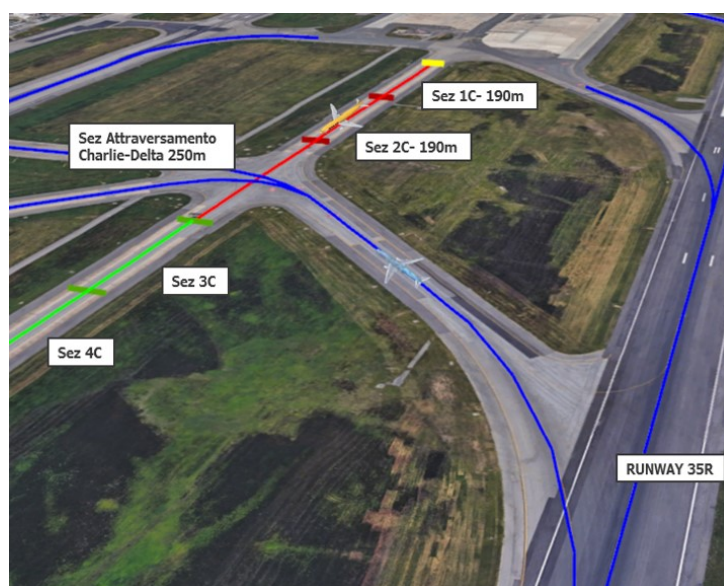


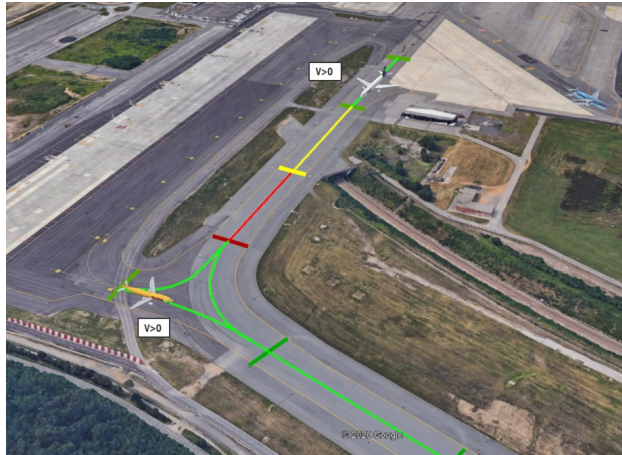
Figura 6.29: Configurazione del sistema nel caso di sopraggiungimento di un aereo da Nord.

6.3.5 Configurazione della Soluzione per i Conflitti con i Voli Cargo Provenienti dal Nuovo Terminal

Il secondo ed ultimo punto singolare della circolazione in linea che ne definisce la configurazione completa riguarda gli sviluppi della nuova area cargo a Sud. L'inserimento degli aeromobili nel sistema in linea avviene in un tratto dove gli aeromobili diretti agli holding point delle Runway 35L Ovest e 35R genera un potenziale conflitto.

Per ovviare a questo sistema, conoscendo la precedenza applicata ad ogni singolo aeromobile, il sistema può avere due tipi di configurazione.

- Configurazione di precedenza per l'aereo in arrivo dal Terminal 1, dove il sistema blocca automaticamente la possibile uscita dell'aeromobile proveniente dall'area cargo. Questo bloccaggio avviene quando l'aeromobile che sopraggiunge si trova a meno di 3 sezioni di blocco, per garantire la frenata di sicurezza nel caso in cui si dovesse verificare una violazione delle prescrizioni.
- Configurazione di precedenza per l'aereo in arrivo dall'area cargo. In questo caso, l'eventuale aereo che sopraggiunge dal Terminal 1 si vedrebbe bloccato dalla configurazione della segnaletica luminosa che rappresenta le sezioni successive occupate dalla presenza dell'aeromobile che si è inserito in linea.



(a) Precedenza all'aeromobile cargo



(b) Precedenza all'aeromobile proveniente da Nord

Figura 6.30: Configurazioni di precedenza possibili per l'intersezione con gli aeromobili provenienti dall'area cargo.

6.4 Ottimizzazione dei Profili di Velocità

Riprendendo la trattazione dei Paragrafi 1.3.1 ed in linea con i più recenti studi citati in questa tesi, si è deciso di implementare un algoritmo di Active Routing che determini in maniera univoca la velocità di taxi che ottimizzi un parametro scelto.

Come specificato nei paragrafi precedenti, gran parte delle spese relative alla procedura di taxi è da ricercarsi in inefficienze delle procedure di Routing e Guidance. È adottata dunque la procedura di Active Routing, che permette l'ottimizzazione della velocità di rullaggio.

I dati da tenere in considerazione sono dunque:

- Stato di traffico
- Condizioni meteo
- Tipo di velivolo

Per ottimizzare gli elementi che concorrono alla determinazione del costo totale di taxi:

- Tempo di taxi
- Emissioni inquinanti
- Consumo di carburante

È evidente come gli obiettivi di questa analisi siano intrinsecamente conflittuali in quanto focalizzati su parametri opposti.

L'aumento della velocità di taxi causa l'impostazione prolungata dei motori su una spinta elevata e il conseguente aumento dei consumi. Viceversa, una diminuzione della velocità di taxi, se non eccessiva, porta ad un miglioramento complessivo delle emissioni inquinanti e dei consumi ma si riflette negativamente sulle condizioni di traffico, fino a provocare condizioni di congestione che paradossalmente si risolvono nell'emissione di più inquinanti e nell'accumulo complessivo di ritardi.

La complessità di questo sistema necessita di una trattazione che prenda in esame un'analisi multi-obiettivo. Al variare della situazione, i pesi delle diverse variabili decisionali subiranno un cambiamento sempre in funzione dell'ottimizzazione della prestazione totale dell'aeroporto.

6.4.1 Modello Matlab

Nel seguente paragrafo viene riportato lo schema di funzionamento del programma scritto per la modellizzazione del fenomeno. Viene considerato un percorso privo di intersezioni con altri aeromobili. Sebbene il programma sia in grado di valutare qualsiasi modello di aeromobile, i calcoli per questo capitolo saranno riferiti al percorso T1-Runway 35R con un Boeing 737-800 Next Generation dotato di due motori CFM56-7B24, in rullaggio dal terminal 1 alla Runway 35R. L'aereo è classificato come codice C.

Per ognuno dei motori presenti nel Fuel Burn Index dell'ICAO, tramite la funzione ICAOdatabase, sono estratti dunque i valori dei consumi, delle emissioni per HC, CO e NOx corrispondenti ad una spinta del 7% e 30% ed interpolati linearmente.

Viene inoltre estratta la spinta nominale, espressa in KiloNewton, per poi analizzare in un secondo momento la potenza effettivamente necessaria per le accelerazioni.

Nell'appendice viene riportato lo schema di funzionamento del programma.

All'interno della prima sezione vengono richiesti i dati riguardanti:

- La configurazione geometrica delle taxiway, quali le lunghezze dei segmenti e la presenza o meno di curve (che limitano la velocità dell'aereo a 10 nodi), la pendenza media del tracciato,
- I dati dell'aeromobile considerato, il modello di motore, il numero di motori, la grandezza della fusoliera
- I dati residui, quali coefficienti di resistenza di forma, coefficienti d'attrito tra pneumatici e pavimentazione,
- I dati cinematici, quindi la velocità di ingresso nel percorso e di uscita da esso (qui posti uguali a 10 nodi in entrata e 0 in uscita, in quanto si arriva all'holding point), i limiti delle accelerazioni di comfort, ricavati dal documento di (Zhang, 2020) e (Daidzic, 2017)
- I limiti di velocità sulla Taxiway e le velocità medie rilevate per gli aeromobili. In mancanza dei dati di rilevazione, verranno utilizzati dei dati ricavati da analisi di letteratura, ipotizzando una velocità di Taxiway massima in rettilineo di 15 m/s.

Per questa trattazione la simulazione sarà impostata sul percorso T1-Runway 35R attraverso il raccordo Hotel. Per tutte le possibili SATR, gli input sono i seguenti:

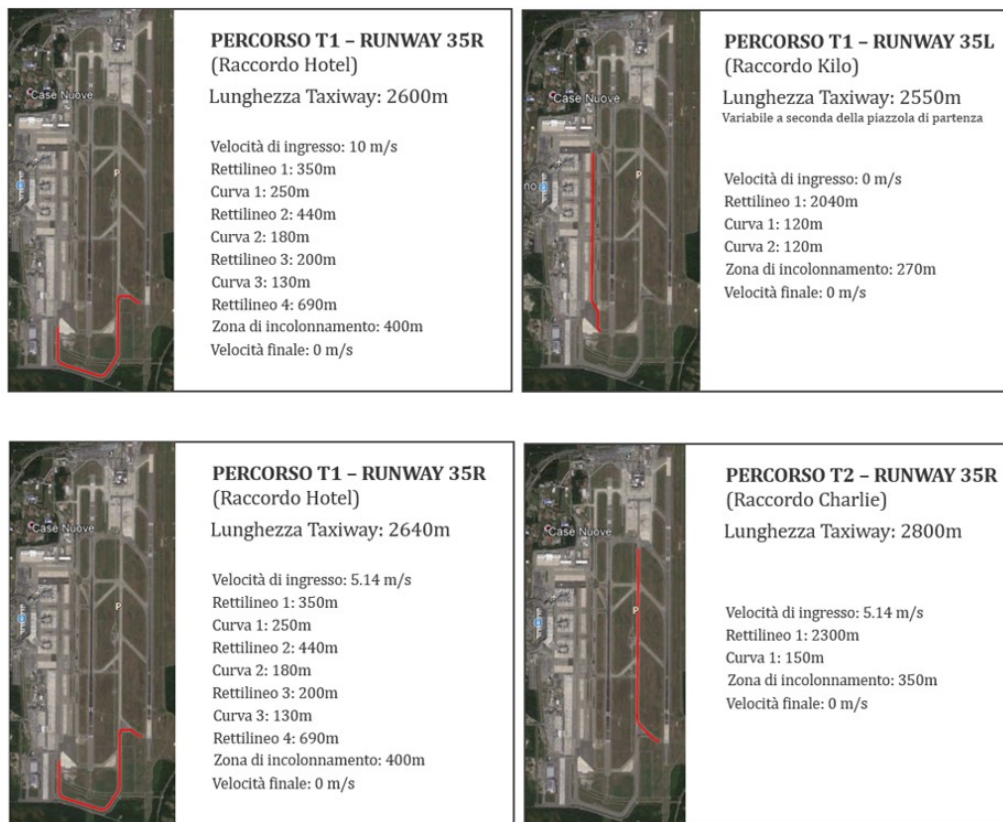


Figura 6.31: SATR per l'aeroporto di Malpensa

Nella sezione successiva, vengono analizzati i dati forniti e vengono prodotti i grafici di consumo riferiti al motore considerato. Per la valutazione dei consumi ci affidiamo al report Nasa APEX citato nel paragrafo 2.2.3. La funzione di flusso del carburante ottenuta originariamente per un aereo di categoria D e mostrata al Paragrafo 1.3.1 viene mantenuta solo come indicazione della forma dell'equazione. In questa maniera vengono interpolati linearmente i valori dei flussi di carburante espressi nel database ICAO e vengono costruiti i diagrammi che relazionano la spinta erogata al flusso di carburante, come riportato in Figura 6.32.

La percentuale di spinta tipica per una fase di taxi, come riportata dagli studi citati in precedenza, varia tra il 5% e il 30% a seconda dell'accelerazione a cui si vuole sottoporre il velivolo. Indicativamente:

- 5%: Accensione del motore da fermo e fase di decelerazione
- 7%: Fase di taxi a velocità costante

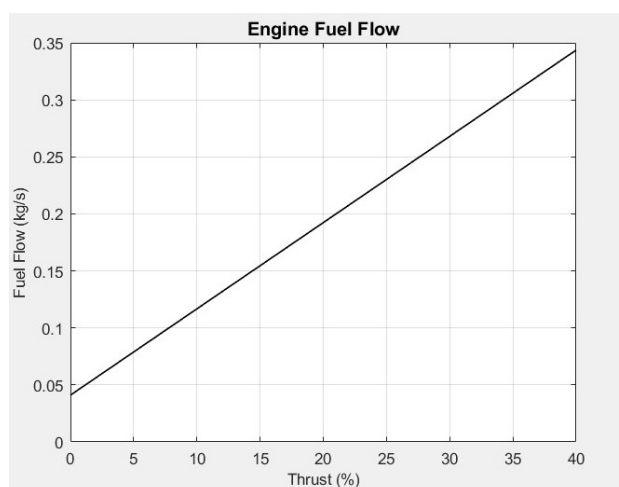


Figura 6.32: Grafico flusso di carburante-spinta di funzionamento

- 20%-40%: Fase di accelerazione

Successivamente, vengono analizzati gli indici di emissione in funzione della percentuale di spinta applicata.

Ci si avvale di una funzione scritta ad-hoc che calcola gli indici di emissione per diversi valori della spinta dei motori, interpolando i valori riportati sul database ICAO degli indici riferiti a HC, CO e NO_x.

La funzione Emission-plot, disponibile in Appendice, unisce in un unico

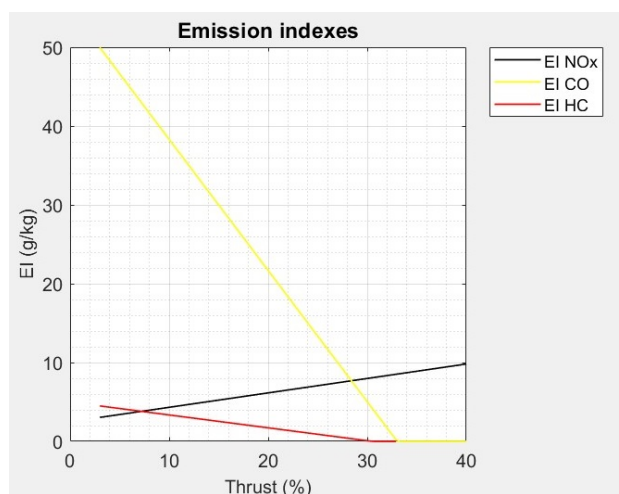


Figura 6.33: Indici di emissione per i diversi inquinanti. Il motore considerato è caratterizzato da basse emissioni di HC rispetto ad altri modelli più obsoleti ma ancora in circolazione

grafico le linee calcolate e le rappresenta.

Si nota che, come ampiamente discusso nel Paragrafo 1.3.2, gli indici di emissione relativi al monossido di carbonio e agli idrocarburi diminuiscono con l'aumentare della potenza, fino ad arrivare ad un valore circa nullo in corrispondenza di una spinta del 30%.

Al contrario l'incide legato agli NOx cresce con il crescere della spinta applicata, essendo legato alle reazioni con gli atomi d'azoto presenti nell'aria, anch'esse crescenti con la potenza impiegata.

Disponendo dunque degli indici di emissione e dei consumi del velivolo considerato al variare della spinta applicata, si procede alla generazione dei diversi diagrammi di trazione al variare della velocità di crociera.

Per la risoluzione del problema, l'algoritmo divide la taxiway in segmenti rettilinei e curvilinei, dove, in base alle condizioni al contorno, genera un processo di ottimizzazione che ricerca l'ottimo in maniera numerica, ipotizzando 100 differenti scenari e minimizzando il parametro considerato.

Sfruttando le velocità in ingresso e in uscita delle singole sezioni intermedie come costanti, e regolate dal valore di 5.14 m/s, che è il valore di velocità di comfort di un aeromobile in curva, i processi di ottimizzazione per le singole sezioni risultano indipendenti tra loro.

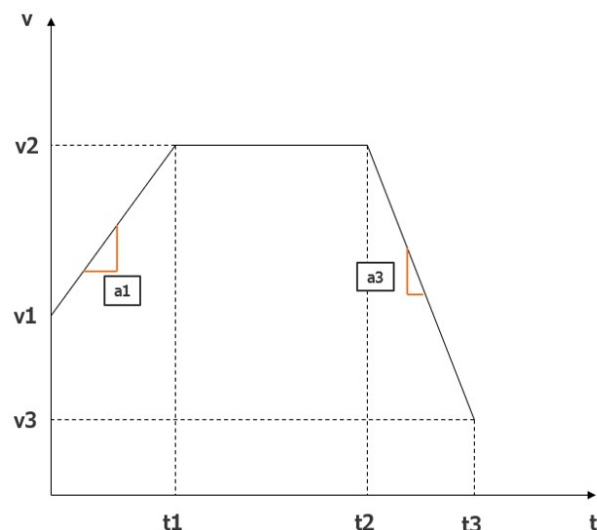


Figura 6.34: Diagramma di trazione generico considerato per una singola sezione

Per una determinata velocità di crociera, per la quale andare a valutare consumi ed emissioni, il diagramma di trazione della sezione considerata è univoco ed i diversi valori in Figura 6.34 possono essere ricavati a partire dai valori di velocità in entrata e in uscita, accelerazioni e lunghezza totale della sezione, sfruttando le equazioni cinematiche del punto materiale.

$$\begin{cases} S_f = S_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \\ v_f = v_0 + a t \end{cases} \quad (6.5)$$

Che adattate al diagramma generico riportato in Figura 6.34 forniscono i dati utili alla computazione del profilo di velocità:

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{v_1^2 - v_0^2}{2a_1} \\ d_3 &= \frac{v_3^2 - v_3^2}{2a_2} \\ v_1 &= v_0 + a_1 t_1 \\ v_3 &= v_2 + a_2 t_3 \\ v_1 &= v_2 \\ d_2 &= v_2 t_2 \\ l &= d_1 + d_2 + d_3 \end{aligned} \quad (6.6)$$

Con:

v_1, v_2 e v_3 = Rispettivamente velocità dell'aeromobile in entrata, velocità massima raggiunta e velocità di uscita dalla sezione.

a_1 e a_2 = Rispettivamente valori di accelerazione e decelerazione di comfort

FF_{jk} = Flusso di carburante (kg/s) in ognuno dei motori relativi al tipo di aereo "j" nella modalità "k"

t_i = Tempo trascorso in ognuna delle 3 modalità

d_1, d_2 e d_3 = Lunghezze rispettivamente della fase di accelerazione, crociera a velocità costante e decelerazione.

l =Lunghezza totale della sezione.

Questo ci permette di dividere ogni sezione in 3 fasi, accelerazione, crociera e decelerazione. La fase di crociera viene ipotizzata a velocità costante, tralasciando il contributo della diminuzione di velocità apportata dalla resistenza dell'aria utilizzando la spinta minima di accensione dei motori, come supposto da Chen e Weiszer [7].

Sempre dallo studio sopra citato, l'accelerazione è posta uguale a $0.6m/s^2$ mentre la decelerazione è posta a $-0.9m/s^2$.

La scelta di una fase di decelerazione piuttosto che una fase di deriva è conseguenza dal fatto che, diversamente dai motori automobilistici, i motori aerei consumano molto carburante anche in fase di crociera, dovendo mantenere una spinta del 5-7% per rimanere accesi.

In questa maniera, simulare una situazione ipotizzando una decelerazione conseguente ad una frenatura, aumenta certamente l'energia dissipata ma riduce notevolmente il tempo di taxi, riducendo il tempo di accensione dei motori e dunque la quantità di carburante consumato.

Il range delle velocità di crociera ammissibili viene segmentato in 100 elementi, nei quali cambia la durata dell'accelerazione e dunque la quantità di tempo passato a velocità di crociera.

Ad ognuna delle 3 diverse fasi del moto è assegnata una spinta dei motori. Essa dovrà garantire l'accelerazione nel primo tratto e la velocità costante nel secondo, andando a vincere le resistenze dell'aria, di rotolamento e la pendenza della taxiway.

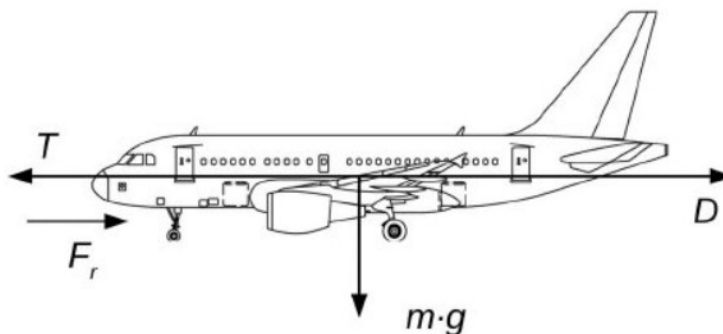


Figura 6.35: Equilibrio delle forze su un aeromobile. Nel modello viene considerata anche l'inclinazione della pista

Dalle equazioni di equilibrio sono dunque ricavati i valori di potenza assegnati ad ognuno dei profili di velocità:

$$\%Thr * F_{max} - R_{aria} - R_{attr} + -\%i = ma$$

$$\%Thr = \frac{R_{aria} + R_{attr} + -\%i + ma}{F_{max}} \quad (6.7)$$

$$\%Thr = \frac{1/2C_d\rho AV^2 + mg\mu_0(1 + v/v_0) + ma + mg * \%slope * 100}{F_{max}}$$

Per ogni profilo di velocità si dispone dei valori di spinta del motore nelle 3 fasi:

- Accelerazione, ottenuta tramite l'equilibrio
- Crociera, calcolata come il massimo tra:
 1. 7% per mantenere il motore acceso
 2. Potenza necessaria a combattere le resistenze e a procedere dunque a velocità costante
- Decelerazione, imposta al 5%

Di conseguenza si conosce il Fuel Flow dei motori associati ad ogni fase. È possibile dunque andare a calcolare il contributo di consumo di emissione e consumi di ognuna di queste fasi del moto, tramite l'equazione 6.8.

Quest'ultima sfrutta la legge citata nel paragrafo 1.3.2 per la determinazione dell'emissione totale per un inquinante:

$$E_{ij} = \sum_k (t_{jk} * 60) * \left(\frac{FF_{jk}}{1000}\right) * (EI_{jk} * NE_j) \quad (6.8)$$

Con:

E_{ij} = Emissione in g dell'inquinante "i" emesso dal tipo di aeromobile "j"

t_{jk} = Tempo di impiego dei motori dell'aeromobile di tipo "j" nella modalità "k" (accelerazione, crociera o decelerazione)

FF_{jk} = Flusso di carburante (kg/s) in ognuno dei motori relativi al tipo di aereo "j" nella modalità "k"

EI_{jk} =Indice di emissione (g/kg combusto) relativo all'aeromobile di tipo "j" nella modalità "k"

NE_j =Numero di motori sull'aereo di tipo "j"

Sommati su tutte e 3 le fasi di accelerazione, crociera e decelerazione.

$$E_{ij} = \sum_k (t_{jk} * 60) * \left(\frac{F_{jk}}{1000} \right) * NE_j \quad (6.9)$$

E l'equazione 6.9 per il consumo totale.

Di conseguenza, reiterando il ciclo per ogni sezione componente la taxiway completa, scegliendo i valori di emissione e velocità a seconda del parametro che si vuole ottimizzare e disponendo i diagrammi di trazione uno dopo l'altro, si ricostruisce il diagramma di trazione finale per il percorso considerato.

Particolare attenzione viene data a 3 diagrammi:

- Ottimizzazione dei consumi, dove il diagramma viene creato scegliendo il valore di velocità di crociera che minimizza i consumi per ogni sezione
- Ottimizzazione degli NOx, dove il diagramma viene ottenuto scegliendo il valore di velocità che minimizza il consumo degli NOx.
- Profilo di velocità rilevato, ovvero il profilo di velocità associato all'effettiva percorrenza dell'aeromobile sul tratto considerato, ipotizzato a velocità costante di 8 m/s in rettilineo. Sarà utilizzato come riferimento per calcolare l'efficienza della soluzione proposta.

L'ottimizzazione delle emissioni di CO e HC, essendo queste inversamente proporzionali alla velocità di crociera per motivazioni già espresse, risultano essere ottimizzate per lo stesso profilo che ottimizza il tempo di taxi, ovvero quello a velocità massima raggiungibile.

I risultati dell'analisi per l'ottimizzazione di carburante per il percorso considerato sono riportati in Figura 6.36 (profilo di velocità) e in Tabella 6.7 (valori di consumi ed emissioni).

Dove il diagramma di trazione nero è quello sperimentale, ipotizzando una velocità di taxi di 8 m/s mentre quello rosso ottimizza il parametro scelto che in questo caso sono i consumi totali.

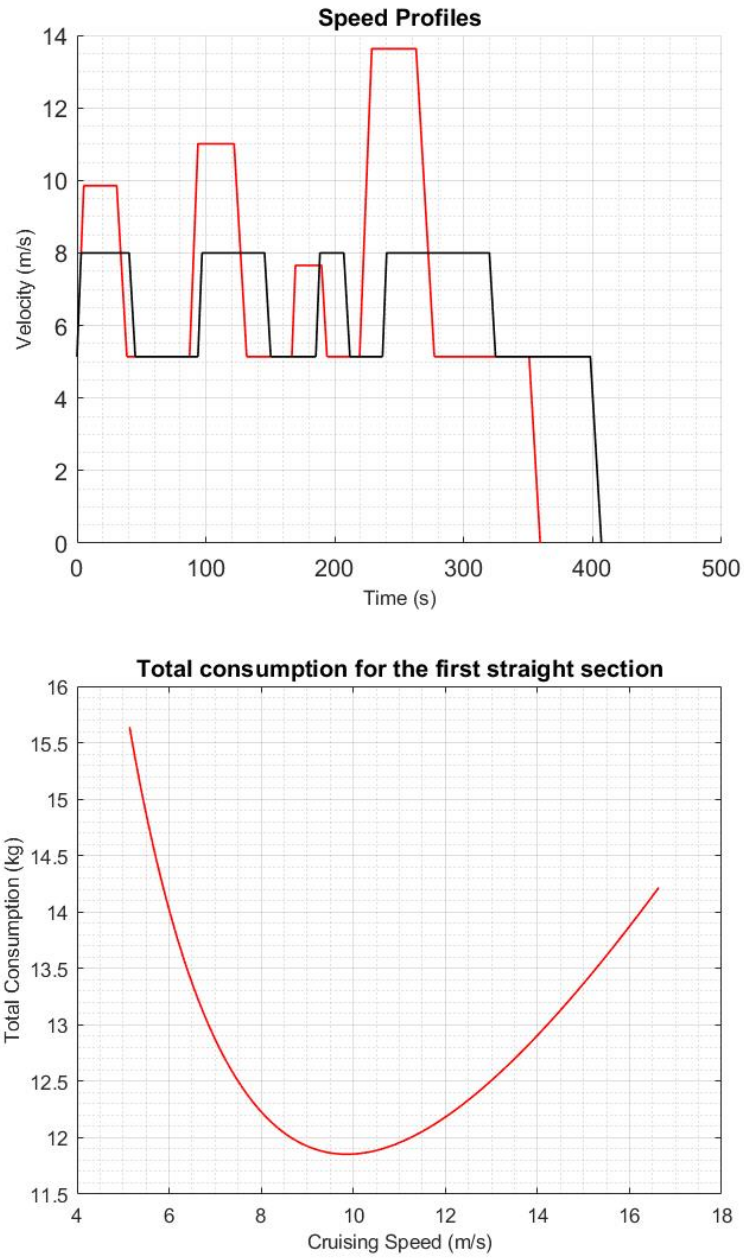


Figura 6.36: Ottimizzazione del Consumo di Carburante

SCENARIO/EMISSIONI	Consumo	Emissioni		
	(kg)	CO (g)	HC (g)	NOx (g)
Non Ottimizzato 8m/s	100.7	1936	200	545.1
Ottimizzazione Cons.	95.9	1634	158	601.4
	-4.75%	-15.6%	-21.3%	+10.3%

Tabella 6.7: Riepilogo dei Risultati per l'Ottimizzazione del Consumo Carburante

Vale la pena sottolineare come il diagramma di trazione ottimizzato presenti dei valori di velocità che sono un compromesso tra i valori massimi teoricamente ammissibili e minimi (10 Nodi). Come evidenziato nella Figura 6.37 (b), per ogni sezione della taxiway considerata esiste un unico valore di ottimo in corrispondenza del quale il valore di velocità rende minimi i consumi. Questo valore non solo dipende dalla configurazione geometrica della taxiway, ma anche dalle caratteristiche dell'aeromobile e dei suoi motori.

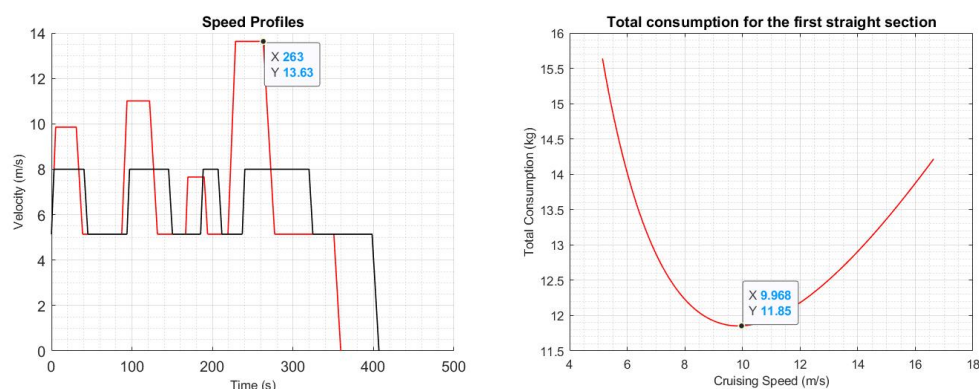


Figura 6.37: Visualizzazione Valori di Ottimo

Si specifica che il diagramma appena ottenuto va a modificare la velocità per ottimizzare i consumi non considerando gli inquinanti. Al contrario, l'ottimizzazione delle emissioni riporterà un risultato diverso. Per snellezza della trattazione, vengono riportati solo i dati relativi all'ottimizzazione NOx in Tabella 6.8.

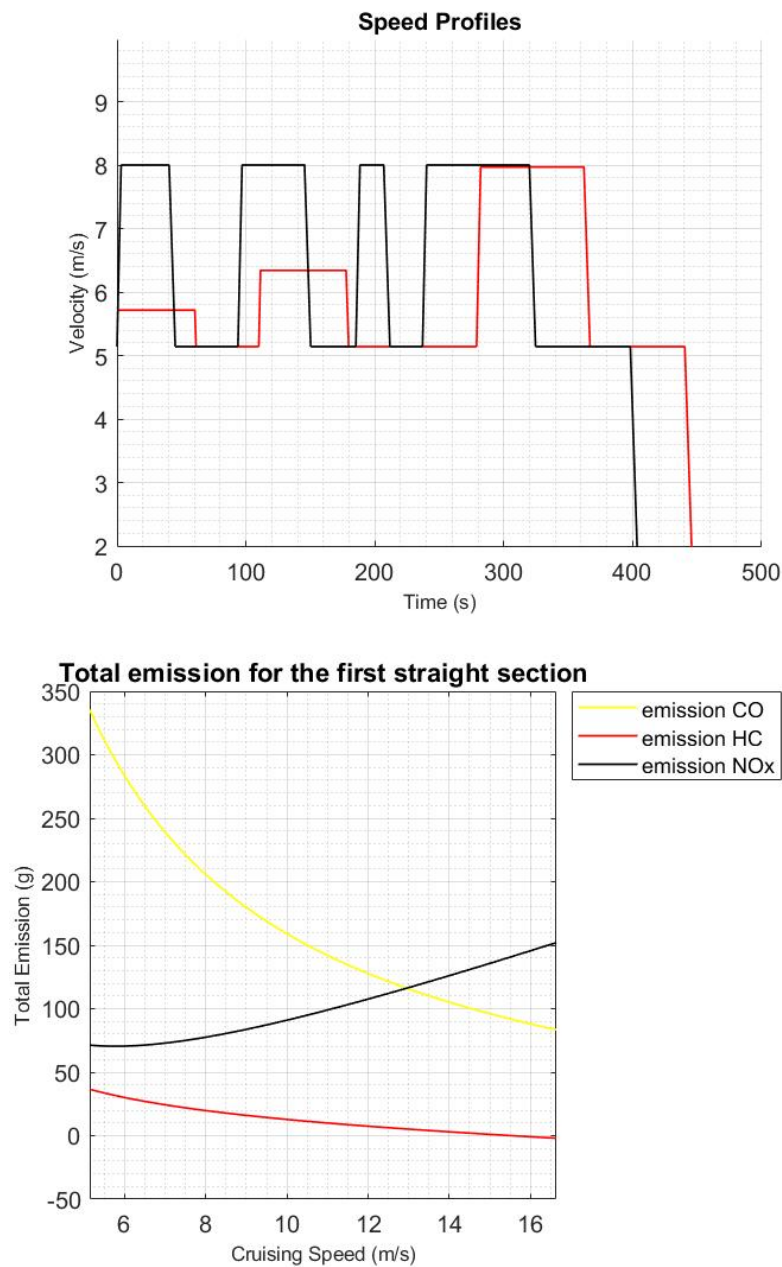


Figura 6.38: Ottimizzazione delle Emissioni di NOx

In questo caso, il programma si focalizza sul problema delle emissioni e genera, come evidente nel profilo rosso, un diagramma all'incirca 40 s più lento. Questo riflette le aspettative che si hanno riguardo le emissioni NOx. Essendo crescenti con il crescere della spinta dei motori, ma anche con il

loro tempo di accensione, c'è un valore di compromesso che è in grado di ottimizzarne le emissioni.

Come fatto in precedenza per i consumi, il programma estrae un diagramma esemplificativo per la prima sezione, dove riporta il variare degli indici di emissione al variare della velocità di crociera.

Nonostante sia meno evidente, il punto di ottimo del diagramma sulla dx corrisponde poi alla velocità nel diagramma di velocità sulla sx.

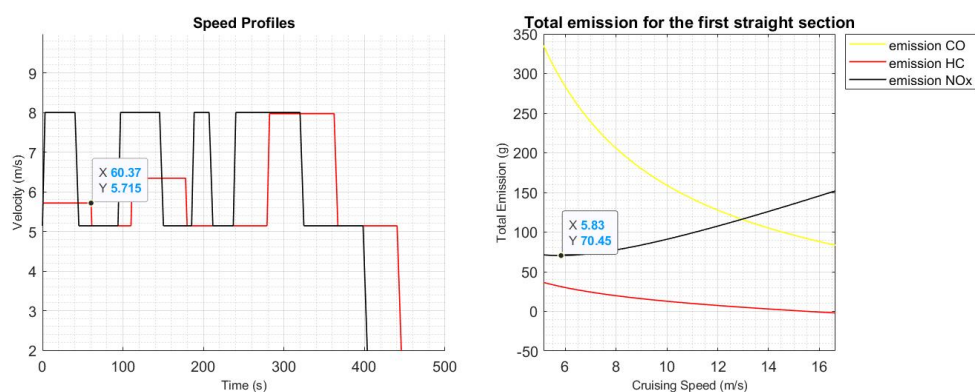


Figura 6.39: Visualizzazione dei Valori di Ottimo

I risultati del programma sono i seguenti:

SCENARIO/EMISSIONI	Consumo (kg)	Emissioni		
		CO (g)	HC (g)	NO _x (g)
Non Ottimizzato 8m/s	100.6	1936.4	200.4	545.1
Ottimizzazione Nox	105.9	2181.8	233.3	518.2
	+5.3%	+12.7%	+16.4%	-4.9%

Tabella 6.8: Riepilogo dei Risultati per l'Ottimizzazione delle Emissioni di NO_x

Confronto Boeing 737-800 Airbus A380



Figura 6.40: Boeing 737-800 ed Airbus A380 a Confronto

Per dimostrare la dipendenza dalla tipologia di motore impiegato, viene effettuata un'analisi su un velivolo wide-body di categoria F, l'Airbus A380 equipaggiato con 4 motori di ultima generazione Trent 970-84, diametro fusoliera di 7.14m e una MTOW di 510 ton, con lo scopo di confrontarlo con i risultati appena ottenuti per il Boeing 787-800.

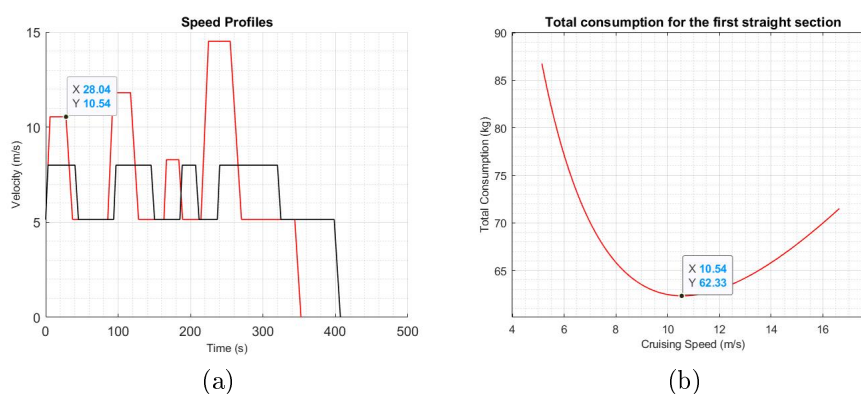


Figura 6.41: Diagramma di Ottimizzazione Consumi per Airbus A380

SCENARIO/EMISSIONI	Consumo (kg)	Emissioni		
		CO (g)	HC (g)	NOx (g)
Non Ottimizzato 8m/s	550.6	7288	91	3421
Ottimizzazione Cons.	516.4	5964	67	3790
	-6.2%	-18.2%	-26.6%	+10.8%

Tabella 6.9: Risultati di Ottimizzazione Consumi per Airbus A380

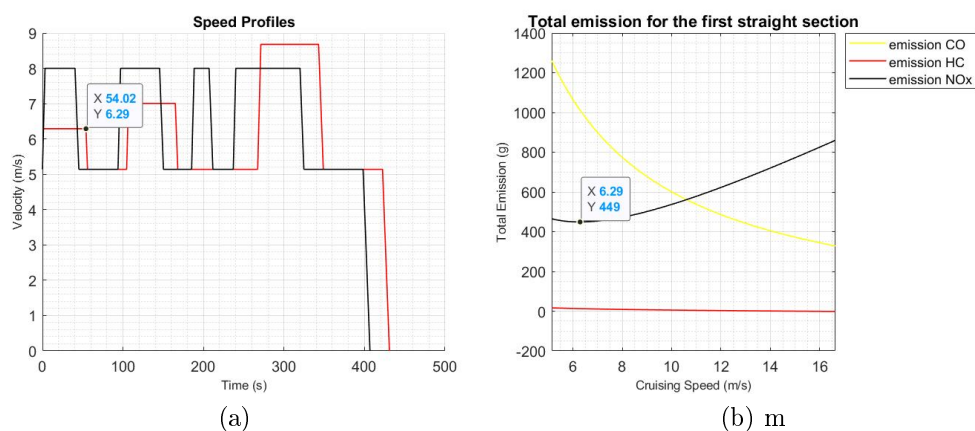


Figura 6.42: Diagramma di Ottimizzazione Emissioni di NOx per Airbus A380

SCENARIO/EMISSIONI	Consumo (kg)	Emissioni		
		CO (g)	HC (g)	NOx (g)
Non Ottimizzato 8m/s	550.6	7288	91	3421
Ottimizzazione Cons.	567.3 +3.0%	7831 +7.4%	100 +10.4%	3313 -3.2%

Tabella 6.10: Risultati di Ottimizzazione Emissioni di NOx per Airbus A380

Dalle tabelle riassuntive sottostanti [6.11,6.12,6.13,6.14], conducendo un'analisi anche su un velivolo leggero, vengono riportati i valori corrispondenti alle diverse ottimizzazioni.

MODELLO	Cons.(kg)	CO(g)	HC(g)	NOx(g)	Time(s)
Learjet35A (Light)	20.4	1140.9	385.0	62.16	407
Boeing 737-800 (Medium)	100.7	1936	200	545.1	407
Airbus A380 (Heavy)	550.6	7288	91	3421	407

Tabella 6.11: Tabella di Confronto tra Diagrammi di Trazione "Sperimentali"

È evidente che l'applicazione di questo algoritmo permette l'ottimizzazione di diversi aspetti dei costi legati alla circolazione a terra.

MODELLO	Cons.(kg)	CO(g)	HC(g)	NOx(g)	Time(s)
Learjet35A (Light)	18.81	969.53	319.1	64.36	348
Boeing 737-800 (Medium)	95.9	1634	158	601.4	359
Airbus A380 (Heavy)	516.4	5964	67	3790	352

Tabella 6.12: Tabella di Confronto tra Diagrammi di Trazione per la Diminuzione del consumo di Carburante per 3 Diversi Modelli di Aeromobili

MODELLO	Cons.(kg)	CO(g)	HC(g)	NOx(g)	Time(s)
Learjet35A (Light)	19.68	1089.8	366.7	60.91	389
Boeing 737-800 (Medium)	105.9	2181.8	233.3	518.2	449
Airbus A380 (Heavy)	567.3	7831	100	3313	431

Tabella 6.13: Tabella di Confronto tra Diagrammi di Trazione per la Diminuzione delle Emissioni di NOx per 3 Diversi Modelli di Aeromobili

Si confronta lo scenario "sperimentale" ad 8 m/s rispetto a quello di ottimizzazione carburante e quello di ottimizzazione degli inquinanti NOx, per evidenziarne le sostanziali differenze.

SCENARIO	Cons.(kg)	CO(g)	HC(g)	NOx(g)	Time(s)
Sperimentale	550.6	7288	91	3421	407
Ott. Carburante	516.4 -6.21%	5964 -21.87%	67 -26.37%	3790 +10.79%	352 -13.51%
Ott. NOx	567.3 +3.03%	7831 +7.45%	100 +9.89%	3313 -3.15%	431 +5.90%

Tabella 6.14: Tabella di confronto delle emissioni tra i diversi scenari di ottimizzazione per Airbus A380.

A seconda dell'obiettivo da perseguire è possibile scegliere una politica di regolazione delle velocità a terra.

SCENARIO	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)
Sperimentale	8.0	8.0	8.0	8.0
Ott. Carburante	10.5 +31.25%	11.8 +47.5%	8.3 +3.75%	14.5 +81.25%
Ott. NOx	6.3 -21.25%	7.00 -12.5%	5.14 -35.75%	8.7 +8.75%

Tabella 6.15: Tabella di confronto delle velocità ottime tra i diversi scenari di ottimizzazione per Airbus A380. Le velocità riportate sono quelle di crociera per ogni tratto rettilineo

Questa ha la caratteristica di cambiare da velivolo a velivolo. La tabella 6.16 analizza i cambiamenti delle velocità massime nei tratti rettilinei della stessa sezione nello scenario di ottimizzazione carburante a diversi aeromobili in circolazione sulla stessa taxiway.

MODELLO	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)
Learjet35A (Light)	11.2	12.5	8.8	15
Boeing 737-800 (Medium)	9.9	11.0	7.7	13.6
Airbus A380 (Heavy)	10.5	11.8	8.3	14.5

Tabella 6.16: Confronto tra Velocità di Consumo Ottimo per Diversi Aeromobili

La trattazione finora condotta sottolinea l'importanza dell'implementazione di un algoritmo di Active Routing. L'ottimizzazione della velocità di circolazione a terra, a seconda del parametro da ottimizzare, porta a notevoli cambiamenti nel valore della variabile di controllo, che può oscillare con valori quasi doppi rispetto ad uno scenario di riferimento.

Lo scenario a velocità 8m/s, naturalmente seguito nelle procedure quotidiane per ottimizzare la capacità in condizioni di congestione, risulta essere uno scenario particolarmente svantaggioso. Attraverso una decisione della torre di controllo o per il rispetto delle normative di emissioni inquinanti, il traffico al di fuori dell'ora di punta può essere ottimizzato a seconda delle esigenze.

6.4.2 Comunicazione della velocità ottima al pilota

L'implementazione del sistema di Active Routing prevede l'installazione di pannelli luminosi a bordo pista che trasmettano l'indicazione di velocità al controllore. In questo modo viene implementato un controllo della velocità senza intervenire direttamente sulla cabina di pilotaggio o tramite radio. Inoltre, si aumenta l'operatività dei controllori di volo che possono dunque trasmettere indicazioni più complesse e complete ai piloti in rullaggio.

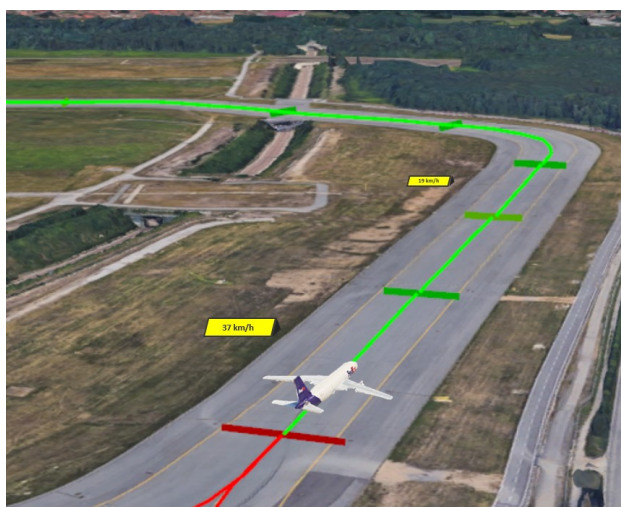


Figura 6.43: Visualizzazione delle Prescrizioni di Velocità

Le funzioni del sistema di controllo, che è deputato alla verifica della conformità del profilo di velocità alle curve di sicurezza, permette oltre alla sua caratteristica principale anche la gestione dei messaggi luminosi. Infatti, congiuntamente al messaggio di allarme trasmesso nella cabina del controllore questo ha la possibilità di presentare un messaggio di allarme per mezzo dei pannelli laterali.

Per concludere, vale la pena esaminare l'effettiva praticabilità di questo sistema nelle condizioni di esercizio tipiche dell'aeroporto di Milano Malpensa.

È evidente che l'ipotesi di flusso indisturbato comporta un'approssimazione delle soluzioni dei diagrammi ottimi in quanto, non considerando potenziali conflitti, non riescono a considerare i tempi di stop. In virtù di questo, il sistema progettato è in grado di prevedere in maniera affidabile l'andamento delle curve dei consumi e delle emissioni in condizioni di bassa capacità, andando dunque a sfruttare in maniera migliore i flussi mattutini

e serali. La grande quantità di flussi di traffico localizzata all'interno delle ore di punta non permette l'applicazione letterale dell'algoritmo, ma lascia comunque spazio a sviluppi futuri.

In ogni modo, la tendenza ad ottimizzare il tempo di taxi nelle ore di punta lascia poco spazio all'ottimizzazione di altri parametri, in quanto in condizioni di congestione ulteriori ritardi significherebbero costi indotti enormemente più grandi dei benefici derivanti dal risparmio di carburante o dalla diminuzione delle emissioni.

6.5 Sistemi di Sicurezza

Come fatto per la circolazione in stazione si definiscono qui più precisamente le diverse funzioni di sicurezza, per inquadrarle in un complesso normativo che ne permetta la categorizzazione.

6.5.1 RMCA e CMAC

Richiamando i concetti espressi al Paragrafo 2.3.2, la funzione di Runway Monitoring and Conflict Alerting è ottenuta tramite il controllo delle curve di sicurezza della posizione dei singoli aeromobili, andando a rilevare eventuali infrazioni. La rete di Stop-Bars situate in punti strategici come i limiti della RPA permettono al sistema di evidenziare una violazione e trasmetterla in maniera chiara ed efficace al controllore di volo.

La possibilità del sistema di rilevare la velocità permette un servizio di prevenzione dei conflitti che è in grado di evidenziare potenziali incidenti, non solo proteggendo gli aeromobili una volta rilevata l'infrazione, ma anche fornendo uno strumento di prevenzione. La collaborazione con il Surface Movement Radar può essere presa in considerazione per aumentare la precisione e l'affidabilità dello strumento.

La procedura di allarme viene così sviluppata:

1. Allerta di tipo 1, con avviso al controllore della possibilità di un'infrazione. Il sistema rileva il passaggio in una stopbar che mette l'aeromobile in condizione di potenziale pericolo. Tuttavia, la risposta del controllore può non essere immediata. In questa maniera, si dispone però dell'attenzione del controllore stesso, che nel caso di sviluppo di un'allerta di tipo 2 è già al corrente della situazione di pericolo e abbrevia dunque il processo decisionale, riducendo il tempo di reazione.
2. Allerta di tipo 2, con avviso al controllore dell'imminenza di un conflitto o del superamento di una barriera di sicurezza. Questo comporta l'intervento del controllore e la conseguente degradazione della marcia.

L'evidente possibilità di includere un servizio di previsione conflitti permette di classificare il sistema come un Conformance Monitoring Alerts for Controllers (CMAC), che se integrato con la procedura di Airport Collaborative Decision Making (A-CDM) dispone delle informazioni necessarie per controllare la conformità di tutte le prescrizioni di rullaggio.

6.5.2 CATCC

Le funzionalità intrinseche nella circolazione in linea di Guidance automatica sono in grado di fornire un doppio controllo sulla prescrizione delle indicazioni di rullaggio. La torre di controllo, tramite i Visual Docking Systems consegna l'informazione nelle mani del pilota. Il sistema, conoscendo la situazione di traffico in tempo reale e potendo prevedere i conflitti dalla costruzione delle curve di velocità, è in grado di correggere eventuali errori dei controllori di volo nelle prescrizioni di rullaggio andando a regolare la marcia dell'aeromobile tramite la segnaletica luminosa, prima ancora che il velivolo incontri una condizione di pericolo.

Il controllo CATCC, di conseguenza, si ottiene tramite la normale fruizione dell'infrastruttura e non è legato all'emissione di un segnale di allarme. Esso corregge automaticamente la decisione del controllore andando a performare un controllo in tempo reale delle condizioni di traffico, modificando le prescrizioni per riportarle all'interno degli standard di sicurezza.

6.6 Concatenamento Dinamico Delle Sezioni

Le lunghezze delle sezioni sono state calcolate, come mostrato nell'Appendice C, ad una velocità di progetto di 30 nodi , equivalente a 15.43 m/s o 55 km/h . Sviluppi successivi comprendono una campagna di rilevamento per le velocità effettive tenute dagli aeromobili in pista, per poter aggiornare questo dato e procedere con una valutazione di efficienza più precisa.

Sebbene nella trattazione condotta al Paragrafo 6.4 e riassunta attraverso i dati disponibili nella Tabella 6.16 si siano ottenute velocità ottimizzate minori della velocità di dimensionamento delle sezioni, la trattazione successiva riportata nel Capitolo 8 evidenzierà come, per un percorso come quello relativo alla Taxiway Charlie si ottengano valori di velocità ottima maggiori di quella di riferimento.

In questo modo, la lunghezza delle sezioni non risulterebbe sufficiente per accomodare lo spazio di frenata e dunque per rispettare i margini di sicurezza.

Richiamando tre particolari funzioni delle sezioni di blocco:

- Funzione di Incremento di Capacità: Garantire il corretto distanziamento degli aeromobili di modo da ottimizzarne il flusso,
- Funzione di Guidance automatica in condizioni di congestione: Garantire la massima capacità di incolonnamento degli aeromobili per efficientare il sistema di gestione delle code,
- Funzione di Sicurezza: Garantire la disponibilità dello spazio di arresto nel caso in cui un aeromobile sia costretto a degradare la marcia.

Risulta evidente il rapporto conflittuale tra i diversi obiettivi nel corso di una giornata aeroportuale, dove, come evidenziato in Figura 8.1, la distribuzione delle partenze orarie subisce notevoli sbalzi.

In ora di punta, l'incremento di capacità si ottiene provvedendo il sistema di management delle code con sezioni piccole, che siano in grado di diminuire i distanziamenti ed avvicinare gli aeromobili, considerando gli spaziamenti ridotti e le velocità di percorrenza.

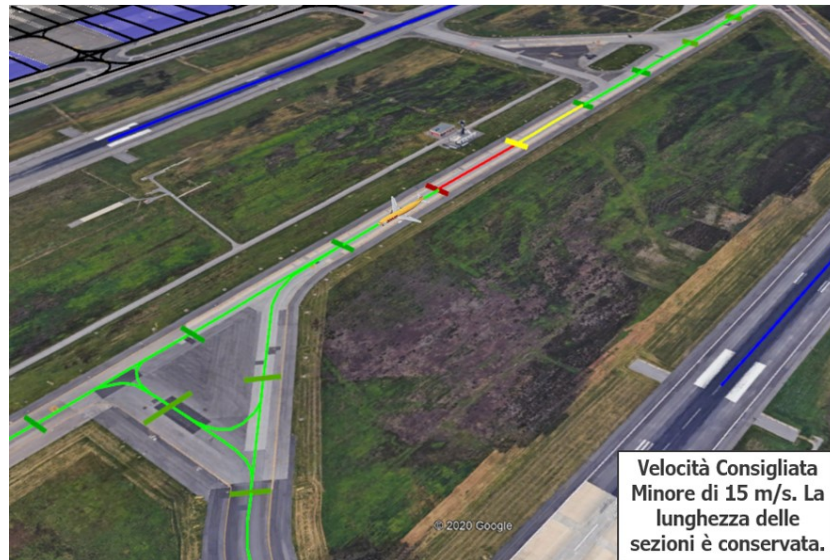
In ora di morbida, dove l'aspetto di management delle code viene meno grazie alla diminuzione dei velivoli circolanti, è fondamentale invece poter garantire, nell'ottica dell'efficientamento delle emissioni e dei consumi, una velocità di rullaggio in linea teorica più alta possibile, allungando le sezioni.

Inoltre, la funzione di sicurezza delle sezioni deve sempre garantire l'esistenza del franco di sicurezza minimo tra due aeromobili.

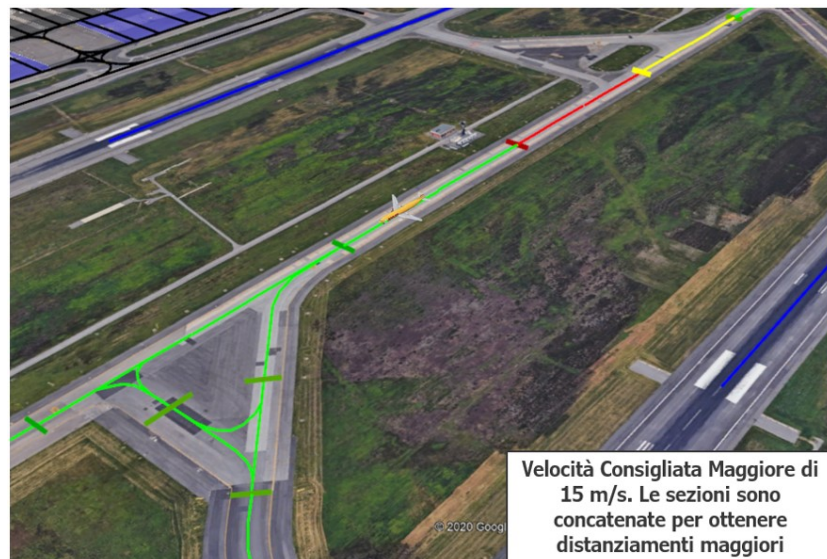
L'algoritmo implementato, riferendosi all'ora di morbida, considera un limite di velocità che ipotizza un concatenamento massimo di 3 sezioni, a seconda della velocità rilevata. Il numero delle sezioni massime concatenate è determinato in funzione della velocità ottima di 25 m/s che viene determinata nella proposta contenuta nel capitolo finale di questa tesi.

Il controllore, tramite la sua interfaccia descritta al Paragrafo 7, imponendo il parametro da ottimizzare all'interno dell'algoritmo di Active Routing, attiva il suggerimento di una velocità ottima. Se questa velocità supera la velocità di dimensionamento delle sezioni, il sistema provvede a concatenare le sezioni per garantire un franco di sicurezza sufficientemente alto rispetto al distanziamento con gli altri aeromobili.

La funzione così sviluppata permette la flessibilità del sistema, aumentando i margini di ottimizzazione e fornendo più libertà di operazione all'algoritmo di Active Routing. In base ai calcoli riportati su questa tesi, la situazione di aumento della velocità si verifica principalmente negli scenari di ottimizzazione sulla taxiway Charlie e sullo scenario più veloce per il percorso T1-Runway35R.



(a) Velocità < 15m/s, Sezione Tipo 150m



(b) Velocità > 15m/s, Sezione Tipo 300m

Figura 6.44: Esempio di concatenamento delle sezioni a seconda degli scenari di Ottimizzazione per la Taxiway Charlie

6.7 Considerazioni

La trattazione di questo capitolo comprende i risultati più interessanti del lavoro di questa tesi.

Il modello di simulazione creato per il caso studio, unico nel suo genere, si configura come primo tentativo di applicazione di un algoritmo di Active Routing. La scelta dell'applicazione di quest'ultimo alla circolazione SATR deriva dalla relativa semplicità del percorso della simulazione da introdurre. L'importanza dell'applicazione viene sottolineata dalla variabilità della velocità ottima in funzione del:

- Tipo di veicolo
- Percorso considerato
- Tipologia di ottimizzazione

Eventuali futuri sviluppi considereranno eventuali fenomeni di start and stop dovuti ad intersezioni, per le quali è consigliato l'utilizzo dei modelli riportati al Paragrafo 1.3.1.

Come si evince dalle illustrazioni del capitolo, i diagrammi di trazione sono stati ipotizzati composti da una parte di frenatura. È lecito pensare che una dissipazione di energia introdotta da una frenatura non abbia a che vedere con un processo di ottimizzazione.

Diversamente dal modello di emissione valido per i motori termici impiegati nelle auto, il motore aereo consuma molto carburante anche a valori di spinta minima, ovvero la necessaria per tenersi acceso.

In Figura 6.32 è evidente come per un aeromobile di categoria C, ad una spinta del 7% corrisponda un consumo di carburante relativamente vicino a quello della fase di accelerazione. In un modello di questo tipo, il tempo di taxi gioca un ruolo fondamentale nella riduzione dei consumi.

In linea di massima, minore è il tempo in cui il motore è acceso, minore è il consumo di carburante. Di conseguenza, la frenatura dell'aeromobile, sebbene intuitivamente potrebbe indurre a pensare ad uno spreco di energia, è la chiave fondamentale per risparmiare tempo e dunque consumare meno.

In seguito al seguente capitolo emerge la possibilità del sistema di:

- Garantire Guidance completamente automatica, limitando il ruolo del controllore di volo a sola sorveglianza ed eventuale retroazione. Riduce la possibilità di collisione anche in condizioni di bassa visibilità, nonostante mantenga la vulnerabilità associata al mancato rispetto delle prescrizioni,
- Concatenare dinamicamente le sezioni, lo strumento più potente di adattabilità del sistema alle differenti condizioni di traffico

Il sistema di sorveglianza a microonde, scelto per la sua particolare flessibilità di impiego, la maturità della tecnologia e per il costo relativamente basso rispetto ai sistemi radar si afferma come l'alternativa migliore per la localizzazione non cooperativa dei velivoli sulla superficie aeroportuale.

Ancora una volta viene ribadita l'importanza del tempo di reazione nella determinazione delle curve di sicurezza, sottolineando l'importanza della concentrazione di futuri sviluppi alla determinazione di questo parametro.

Capitolo 7

Human Machine Interface

Dopo aver definito le funzioni dei singoli componenti del sistema, la trattazione di questo capitolo è dedicata al concetto di Interfaccia Uomo-Macchina proposto per il lavoro condotto finora.

Si descrive la struttura di funzionamento della torre di controllo provvista di sistema A-SMGCS, per comprendere al meglio il ruolo delle strumentazioni definite ai Paragrafi precedenti dal punto di vista del controllore del traffico aereo.

Senza esulare dalla trattazione oggetto della tesi, verranno definite le funzioni fondamentali che il sistema dovrà assolvere per permettere l'interoperabilità totale ed il rispetto delle normative di sicurezza.

La presentazione della HMI conclude la configurazione del sistema integrando i dati provenienti da entrambi i settori dell'aeroporto (i.e. circolazione in stazione, circolazione in linea).

7.1 La torre di controllo di Milano Malpensa

Al giorno d'oggi, l'interfaccia della torre di controllo di Milano Malpensa presenta una serie di schermi su cui sono rappresentati in tempo reale i parametri più significativi.



Figura 7.1: Torre di Controllo di Malpensa

Indagando le soluzioni riportate dai maggiori player in commercio e specificate anche nel progetto ITWP (Integrated Tower Working Position), la tendenza è quella di raggruppare le funzionalità dell'aeroporto all'interno di un'unica interfaccia che dia al controllore di volo uno schema chiaro della situazione all'istante considerato.

In questa configurazione totale, il sistema A-SGCM fornisce la completa consapevolezza del solo settore di circolazione a terra.

Alcune aziende forniscono un servizio, dove la normativa lo permette, di torre di controllo sviluppata in remoto. Il grado di automazione raggiunto dalla posizione di controllo deve essere tale da permettere l'ipotetica mancanza della procedura di verifica visiva a costo di non inficiare la sicurezza del sistema.

Malpensa risulta aver già sperimentato la gestione di torre in remoto, guidando i movimenti operati a Milano Linate tramite una sala di controllo a 50km in linea d'aria dalla pista di volo interessata [31].

7.2 Configurazione HMI proposta

La HMI è la dashboard principale dove viene visualizzato lo stato della circolazione aerea a terra all'istante considerato.

La schermata principale comprende:

- Mappa dell'aeroporto
- Percorsi
- Etichette, rappresentanti le caratteristiche dell'aeromobile contrassegnato
- Indicatori di allerta di sicurezza
- Status di sistema

La collaborazione con il database A-CDM provvede a fornire informazioni di volo che vengono presentate sotto forma di etichette.

La tematica di integrazione delle informazioni è di vitale importanza per favorire il processo di decision making. Informazioni in tempo reale sullo stato di congestione dello spazio aereo o sullo stato di preparazione delle procedure di imbarco ai gate sono necessarie per permettere al controllore una scelta sensata.



Figura 7.2: Schermata HMI

In un dato istante, è possibile per il controllore di volo andare a:

- Identificare univocamente ogni veicolo in circolazione,
- Definire un percorso per un dato aeromobile,
- Modificare il percorso manualmente,
- Attivare il segnalamento di partenza per un aeromobile al momento più opportuno (tramite Visual Docking Systems)
- Controllare che le prescrizioni di marcia vengano rispettate, monitorando i segnali di allerta,
- Intervenire in situazione di necessità,
- Autorizzare al decollo gli aeromobili fermi all'holding point.

Per permettere queste operazioni, l'interfaccia presenta le seguenti informazioni:

- Layout aeroportuale,
- Posizione dei singoli aeromobili,
- Percorsi dei singoli aeromobili,
- Condizione di segnalamento,
- Identità e caratteristiche di marcia dei singoli velivoli,
- Indicatori di allerta di sicurezza (RMCA, CATCC, CMAC),
- Orario arrivi e partenze
- Segnale di stato delle procedure di imbarco per i singoli aeromobili in piazzola
- Tempo stimato rimanente al decollo/stazionamento.

Inoltre presenta una plancia di comando, che può essere fisica o digitale, sulla quale impostare per ogni movimento l'origine e la destinazione. In base all'algoritmo di Routing prescelto e alle condizioni di precedenza rilevate, come spiegato al Paragrafo 5.3.3, il sistema genera il percorso che viene visualizzato sulla HMI, come in Figura 7.3.

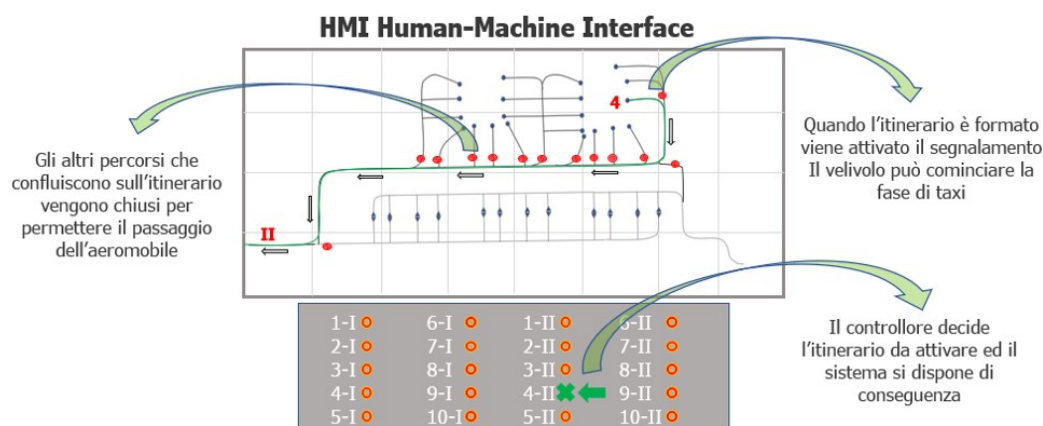


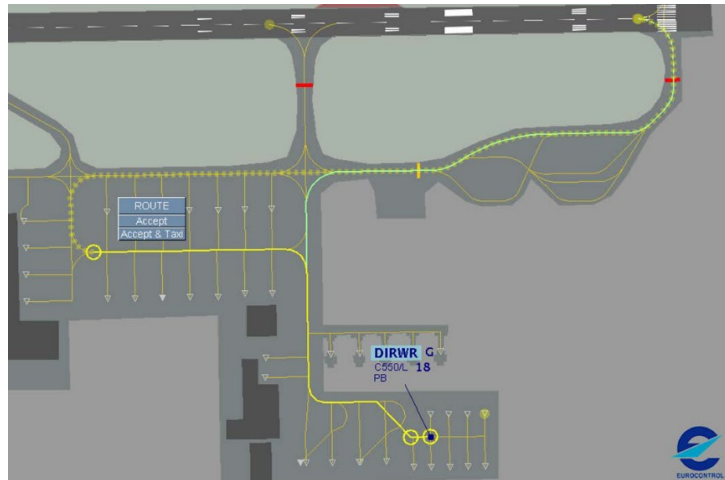
Figura 7.3: Ipotesi Rappresentativa di una Porzione della Schermata HMI.

Nell'ottica di un sistema A-SMGCS che permetta al controllore di pianificare l'itinerario e successivamente di riagganciare le comunicazioni solo al momento della clearance per il decollo, è necessario specificare il meccanismo di notifica delle indicazioni di allerta di tipo 1 e 2 citate al Paragrafo 2.3.2 e 6.5.1.

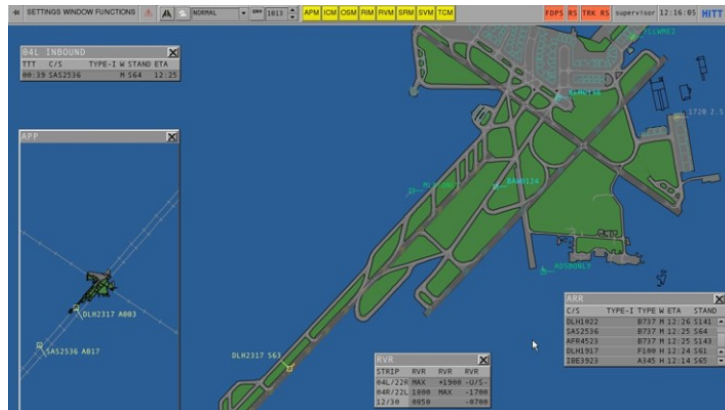
L'allerta di tipo 1 ha come principale scopo quello di essere rappresentata sulla HMI e di avvertire il controllore di una situazione che, possibilmente, potrebbe degenerare in una condizione di pericolo.

Il preavviso del sistema permette di ottimizzare il tempo di risposta del controllore di volo al momento del rilascio di un'allerta di Tipo 2, attirando la sua attenzione in un momento effettivamente precedente al pericolo imminente.

L'importanza del tempo di reazione nella definizione della distanza di sicurezza è già stato trattato nel Paragrafo 6.2.2. Essa viene attivata nel momento in cui la posizione e la velocità dell'aeromobile sottolineano, tramite valutazioni sulle curve di sicurezza, un potenziale pericolo.



(a) Esempio di HMI dal manuale EUROCONTROL



(b) HMI proposta da Saab

Figura 7.4: Esempi di HMI

La configurazione definita in questo capitolo termina la struttura complessiva del sistema, assolvendo all'obiettivo iniziale di limitare le comunicazioni radio alla sola clearance per il decollo e agli interventi di sicurezza relativi alla degradazione della marcia.

Dalla trattazione emerge inoltre il ruolo fondamentale dei due livelli di allerta. Per la determinazione del tempo di intervento del controllore, l'allerta preventiva predispone il controllore alla degradazione della marcia. Futuri sviluppi dovranno tenere in considerazione questo tipo di configurazione al fine di diminuire il tempo di reazione.

Capitolo 8

Valutazione di scenari operativi complessivi

Terminata la configurazione di entrambi i sistemi componenti la circolazione a terra, in questo capitolo viene stimato l'effettivo miglioramento introdotto dal sistema nei suoi aspetti più quantificabili.

Per la mancanza di un software di simulazione, si lascerà la valutazione di efficienza della configurazione di circolazione in stazione a futuri sviluppi.

Per la circolazione in linea verrà invece valutato l'impatto dell'applicazione dell'algoritmo di Active Routing su diversi percorsi di interesse, evidenziando margini di ottimizzazioni ed identificando una proposta di aumento velocità per la Taxiway Charlie, supportata dai dati di simulazione.

8.1 Metodologia di Approccio

Tenendo in mente i bisogni espressi dalle analisi preliminari condotte per l'aeroporto e modellizzando tramite il modello espresso nel Paragrafo 6.4.1, siamo in grado di andare a considerare l'impatto causato dall'adozione del sistema A-SMGCS a blocchi automatizzati nel panorama aeroportuale di Milano Malpensa.

Esattamente come condotto per la configurazione di sistema, la circolazione in stazione e la circolazione in linea presentano impatti diversi a livello di efficientamento delle procedure, e di conseguenza saranno trattati in maniera diversa nella trattazione seguente.

L'analisi che verrà portata avanti in questo capitolo considererà una serie di assunzioni preliminari volte a semplificare l'entità del problema considerato.

- Nella circolazione in stazione sarà ignorato il contributo di capacità dovuto all'efficientamento delle procedure a terra. La mancanza di un software di simulazione delle procedure non permette la quantificazione del tempo risparmiato e la diminuzione del punteggio di rischio, che si monetizzerebbe in una diminuzione dei premi assicurativi e una generica riduzione del carburante consumato.
- Nella circolazione in linea saranno considerati gli scenari di ottimizzazione di carburante ed emissioni, generando 4 differenti sotto-problemi nel caso di ora di morbida, mentre nell'ora di punta sarà ipotizzato il meccanismo di funzionamento odierno. La ragione di questa considerazione risiede nella grande importanza del tempo totale di taxiway rispetto all'efficienza ambientale nei periodi di punta.

8.2 Creazione Matrice O/D

Considerando che la seguente trattazione di efficienza per la valutazione dell'impatto dell'Active Routing sarà condotta in orario di morbida, si rende necessario definire una matrice di Origine/Destinazione che prenda in esame i percorsi tra i terminal e le Runway in suddetti orari.

Si procede dunque identificando le fasce orarie di punta tramite i dati disponibili online.

Le distribuzioni dei voli per Runway rese disponibili da SEA e che vengono riportate in Figura 4.6 e 4.7 sono organizzate secondo la seguente divisione:

- Orario Diurno, dalle 6.00 alle 20.00
- Orario Serale, dalle 20.00 alle 22.00
- Orario Notturmo, dalle 22.00 alle 6.00

In quanto derivanti dalla normativa DL 19 agosto 2005, n. 194 relativa alle emissioni acustiche. Sono dunque disponibili i dati di utilizzazione delle piste.

Gli orari di frequentazione più assidui dell'aeroporto, come rappresentato nella Figura 8.1, possono essere ricavati dai dati disponibili su Google.com.

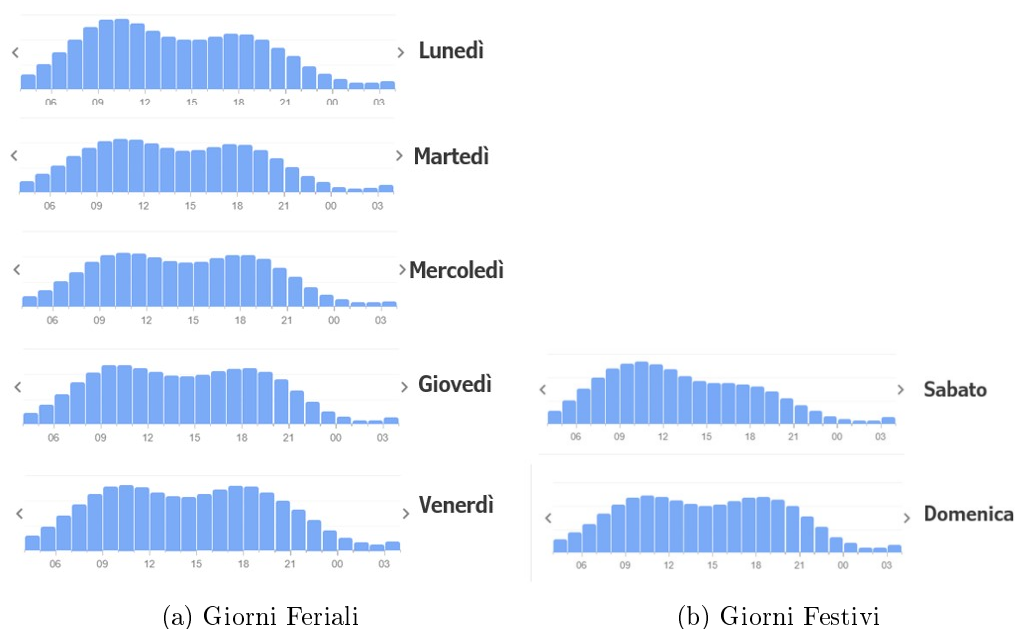


Figura 8.1: Dati di Affollamento Relativi all'Aeroporto di Milano Malpensa

Si può dunque, conoscendo le affluenze giornaliere, andare a determinare quale siano, all'interno degli orari identificati dalla normativa acustica come "Diurni", le ore di punta.

Si ipotizza dunque lo schema di ripartizione oraria dei movimenti come riportato nella Tabella seguente. Vale la pena specificare che i dati di traffico qui ottenuti sono stati ipotizzati tramite considerazioni qualitative, distribuendo i voli registrati secondo gli orari con presenza maggiore di passeggeri. Una campagna di rilevamento dei dati potrebbe fornire la disaggregazione necessaria per migliorare lo studio. Tuttavia, la stima è pensata per avvicinarsi il più possibile al valore dei dati di traffico reale.

Data la corrente situazione sanitaria, infatti, la raccolta dati è notevolmente inibita e qualsiasi tipo di rilevamento sarebbe influenzato dalla diminuzione drastica della domanda negli ultimi mesi.

ORARIO	N° Movimenti/h
Ore di Punta 10-12, 17-19	53.3
Ore di Morbida Diurne 6-10, 12-17, 19-22	20
Ore di Morbida Notturne 22-6	6
Totale Movimenti/gg	501

Tabella 8.1: Valori di Distribuzione dei Movimenti durante la Giornata

L'ultimo passo per la creazione della matrice origine destinazione è dunque determinare a quali piste e terminal sono diretti i diversi aeromobili per le procedure di rullaggio. La conoscenza del terminal di approccio dell'aeromobile è in grado di fornirci informazioni circa il percorso seguito, così da poter valutare l'efficacia del meccanismo di Active Routing sul percorso considerato.

Sapendo che l'attività del Terminal 2 è limitata alla compagnia Easyjet, si considera un'intervista recentemente rilasciata da Lorenzo Lagorio, country manager per l'Italia, per la quale attività della compagnia Easyjet al Termi-

nal 2 conta 21 aerei, fino a un massimo di 164 operazioni giornaliere e 7,8 milioni di passeggeri trasportati nel 2018.[1].

Questo dato ci permette di determinare la quantità di aeromobili che approcciano il T2 durante una giornata media. Conoscendo la quantità di movimenti giornalieri, pari a 501, e la quantità dei movimenti del Terminal 2, pari a 164, si suddividono in percentuale i voli sui due terminal (66% al T1 e 34% al T2). Si ottiene dunque la tabella seguente:

ORARIO	N° Movimenti/h T1	N° Movimenti/h T2
Ore di Punta 10-12, 17-19	35.8	17.4
Ore di Morbida Diurne 6-10, 12-17, 19-22	13.5	6.6
Ore di Morbida Notturne 22-6	4.0	2.0
Totale Movimenti/gg	337	164

Tabella 8.2: Movimenti orari divisi per i diversi terminal

Successivamente, si analizzano i movimenti totali di ogni terminal assegnandoli alle piste corrispondenti, conoscendo le percentuali di utilizzazione delle piste dal report SEA [40] sul rumore aeroportuale, riportati alla Tabella 8.3 e ottenuti dalla Figura 4.7.

ORARIO/PISTA	Att.35L	Att.35R	Dec.35L	Dec.35R
Ore di Punta 10-12, 17-19	25.7%	21.6%	24.9%	26.5%
Ore di Morbida Diurne 6-10, 12-17, 19-22	27.9%	21.3%	23.0%	27.9%
Ore di Morbida Notturne 22-6	41.7%	31.3%	8.3%	12.5%

Tabella 8.3: Percentuale di Distribuzione dei Movimenti per pista durante la giornata, ottenuta dalla Figura 4.7

Per riassumere, la procedura seguita per la determinazione delle matrici può essere così schematizzata:

1. Si individua la quantità di movimenti/h per la fascia oraria considerata tramite la Tabella 8.1
2. Si dividono i movimenti/h dell'aeroporto nel suo complesso nei due terminal, seguendo una proporzione 2:3,
3. Si suddivide, tramite i dati riportati in Tabella 8.3 e in Figura 4.7 i movimenti a seconda delle piste.

Si ottengono dunque le seguenti Matrici O/D per le piste di Milano Malpensa. Le seguenti Matrici sono ottenute solo per orari di morbida, come sottolineato nelle considerazioni al Paragrafo 8.

Ancora una volta è giusto sottolineare che gran parte delle considerazioni sulla distribuzione dei flussi di traffico deriva da un'approssimazione e non viene da un'analisi rigorosa. Successivi sviluppi potranno affinare questo dato per una valutazione più accurata dell'aumento dell'efficienza aeroportuale portato dall'adozione della procedura di Active-Routing.

PISTA/TERMINAL	Terminal 1	Terminal 2
35L	3.9	1.7
35R	2.7	1.6
TOT	6.6	3.3

Tabella 8.4: Matrice O/D atterraggi per ora di Morbida Diurna. La quantità dei movimenti in atterraggio è 9.9mov/h

PISTA/TERMINAL	35L	35R	TOT
Terminal 1	3.2	3.7	6.9
Terminal 2	1.4	1.9	3.3

Tabella 8.5: Matrice O/D decolli per ora di Morbida Diurna. La quantità dei movimenti in decollo è 10.5mov/h

La Matrice O/D riferita agli atterraggi per le ore di morbida comprende in totale un totale di 9.9 movimenti l'ora. Si nota come la differenza dei flussi in entrata ed in uscita dell'aeroporto non è necessariamente uguale a zero in quanto l'intervallo considerato non è sufficientemente lungo. Eventuali differenze tra i flussi in entrata e in uscita sono alla base dell'aumento degli

aeromobili circolanti in pista nelle ore di punta. Queste disparità vengono logicamente recuperate nelle altre fasce orarie.

La Matrice O/D riferita ai decolli per le ore di morbida comprende un totale di 10.2 movimenti l'ora.

Siccome la trattazione finora condotta è stata principalmente qualitativa, si effettuano delle verifiche. La distribuzione dei movimenti aerei per le ore di morbida diurne per la creazione della matrice O/D a partire dai dati disponibili deve rispettare:

1. La quantità totale di movimenti/h, uguale a 20.
2. La divisione dei movimenti per pista, rappresentata in Tabella 8.4
3. La divisione di movimenti per Terminal, come riportato in Tabella 8.2

Al netto di trascurabili approssimazioni, le matrici O/D prodotte soddisfano i seguenti requisiti e sono dunque utilizzabili come rappresentazione dei percorsi aerei in circolazione a terra.

Si riportano di seguito le matrici O/D relative alla circolazione notturna, ottenute tramite lo stesso procedimento.

PISTA/TERMINAL	Terminal 1	Terminal 2
35L	1.7	0.8
35R	1.3	0.6
TOT	3.0	1.4

Tabella 8.6: Matrice O/D atterraggi per ore notturne.

PISTA/TERMINAL	35L	35R	TOT
Terminal 1	0.3	0.5	0.8
Terminal 2	0.2	0.3	0.5

Tabella 8.7: Matrice O/D decolli per ore notturne.

Si nota come nelle ore notturne il numero totale dei movimenti/h non risulta uguale a 6. Questo è dovuto al fatto che, per snellire le operazioni di rullaggio, nell'eventualità che la pista sia completamente sgombra, i

controllori prescrivono alcuni decolli o atterraggi in mattinata sulle 17R e 17L. Questi ultimi non vengono riportati in quanto non di interesse nella trattazione complessiva del problema di Active Routing.

8.2.1 Percorsi di Ottimizzazione

Richiamando i concetti espressi nel Paragrafo 6.4 e i percorsi riportati in Figura 6.31 siamo in grado di ricostruire i movimenti annuali.

I percorsi su cui si andrà a valutare le prestazioni dell'algoritmo sono quelli riportati nella figura seguente. Il percorso tra T1 e Runway 35L viene conservativamente omesso ipotizzando l'utilizzazione dell'ingresso Sud-Est come sezione di incolonnamento e dunque sfruttando in maniera trascurabile i benefici del sistema di Active Routing per la circolazione in linea. (Figura 6.5)

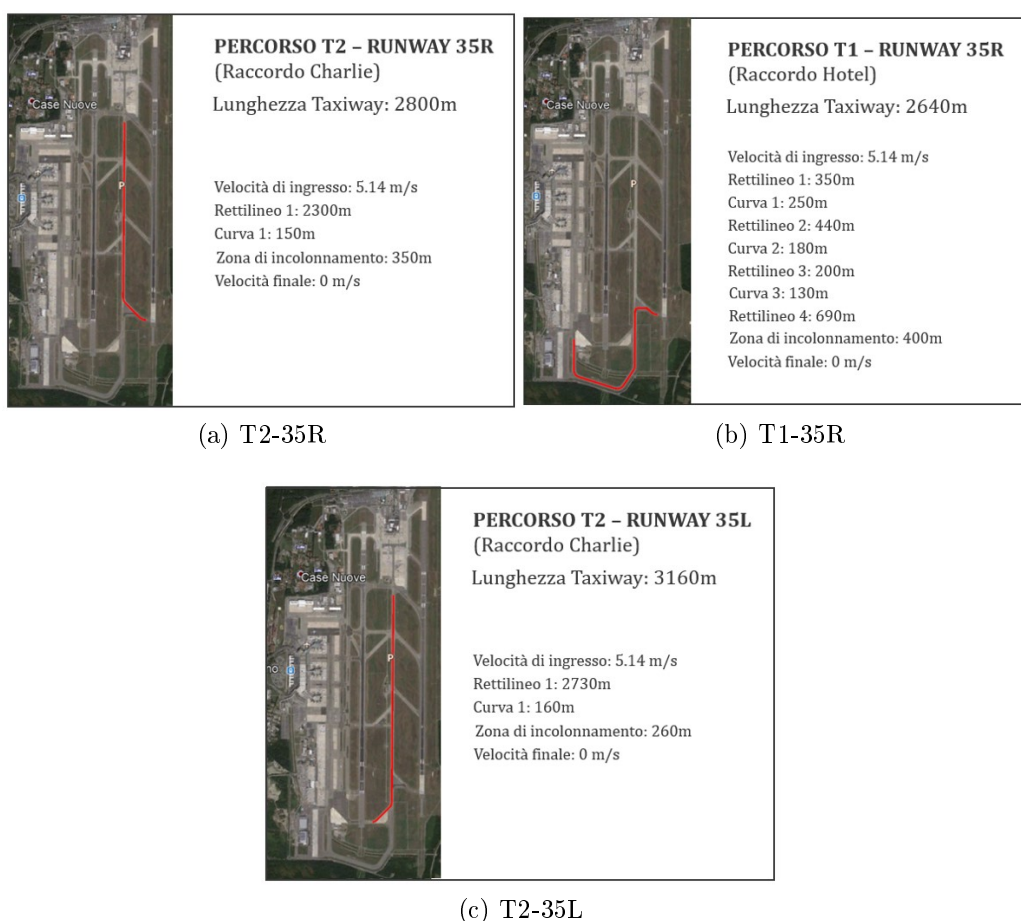


Figura 8.2: Percorsi SATR Considerati per la Valutazione del Processo di Ottimizzazione

Per la determinazione dei movimenti annuali si sono sommati i dati delle

matrici O/D relative ai decolli per situazioni di ora di morbida diurna e per ore notturne.

PERCORSI	Movimenti Giornalieri	Movimenti Annuali
T1-35R	48.4	17666
T2-35R	25.2	9198
T2-35L	18.4	6716

Tabella 8.8: Numero totale di movimenti su ogni percorso

8.3 Aumento delle Prestazioni

Richiamando la composizione di traffico espressa sullo studio di mappatura acustica dell'aeroporto di Malpensa [40], l'aeromobile considerato per la determinazione delle prestazioni con Active Routing sarà un Airbus A320 dotato di due motori a turboventola CFM56-5C2, apertura alare di 34.10m, diametro fusoliera di 4.14m, MTOW di 73000kg.

La scelta dell'aereo più utilizzato sulla pista è rappresentativo di una media delle dimensioni degli aeromobili operanti, trattandosi di un velivolo di categoria C.

Per un'efficace valutazione dell'adozione dei profili di velocità ottimizzati, bisognerebbe disporre dei dati di velocità di crociera media per ogni aeromobile. Lo scopo dell'algoritmo di Active Routing è quello di andare ad operare sul margine di ottimizzazione compreso tra le velocità tenute intuitivamente dai piloti al comando e al velocità ottima del sistema.

Per tutti i percorsi (T1-Runway 35R, T2-Runway 35R, T2-Runway 35L) la velocità di crociera massima di riferimento è posta a 8m/s (29 km/h o 15 nodi).

8.3.1 Percorso T1-Runway 35R

Sul percorso riportato in Figura 8.2 (a) si simula il processo per i 4 parametri possibili. Per le caratteristiche intrinseche di emissioni dei motori, i valori di ottimizzazione delle emissioni di HC e CO coincidono e vengono dunque trattate in un paragrafo unico.

Ottimizzazione del Consumo di Carburante

Per l'ottimizzazione del consumo di carburante considerando una velocità di crociera di riferimento di 8 m/s si ottiene il seguente grafico del profilo di velocità.

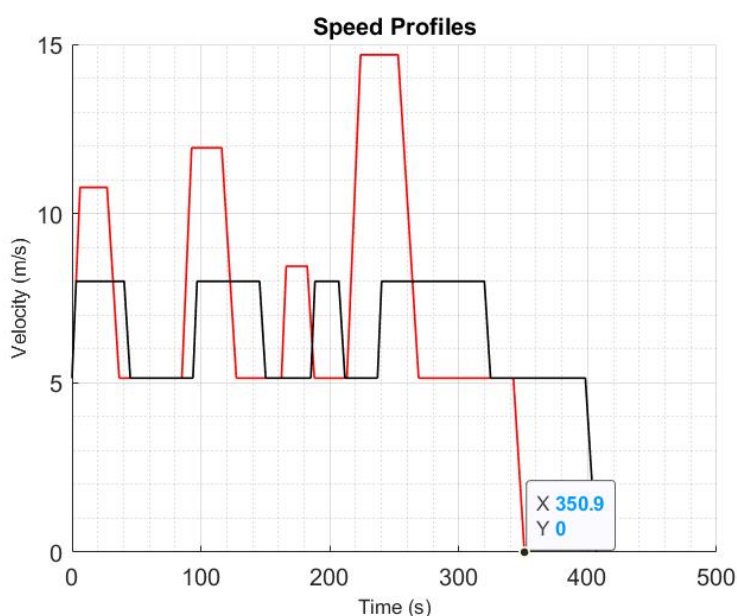


Figura 8.3: Ottimizzazione Consumi Percorso T1-35R, Caso 1. Il profilo nero è ottenuto ipotizzando la velocità di crociera, il profilo rosso è ottenuto tramite ottimizzazione.

I risultati dell'esecuzione del programma di ottimizzazione, evidenziati in figura con il profilo rosso, sono invece riportati nella Tabella 8.9. Si nota come l'ottimizzazione del profilo cinematico, mediante l'imposizione di una certa velocità nei tratti rettilinei, porta ad un risparmio di carburante all'incirca del 7% per ogni rullaggio completato.

Per uno studio più completo e vista la mancanza di dati che riflettano la situazione di rullaggio reale, viene condotta una simulazione con velocità di crociera massima uguale a 15 m/s, per evidenziare come anche una velocità

SCENARIO/EMISSIONI	Consumo	Emissioni		
	(kg)	CO (g)	HC (g)	NOx (g)
Non Ottimizzato 8m/s	100.4	3153.3	525.0	468.1
Ottimizzazione Cons.	93.50	2582.1	427.4	499.3
	-6.9%	-18.1%	-18.6%	+6.7%

Tabella 8.9: Confronto tra Scenario Consumo Ottimo e Scenario non Ottimizzato, Caso 1

maggiore di quella di ottimizzazione comporti una perdita di performance. Il profilo di velocità corrispondente ad una velocità di crociera di 15 m/s è dunque calcolato ed i risultati del programma di simulazione sono riportati in Tabella 8.10

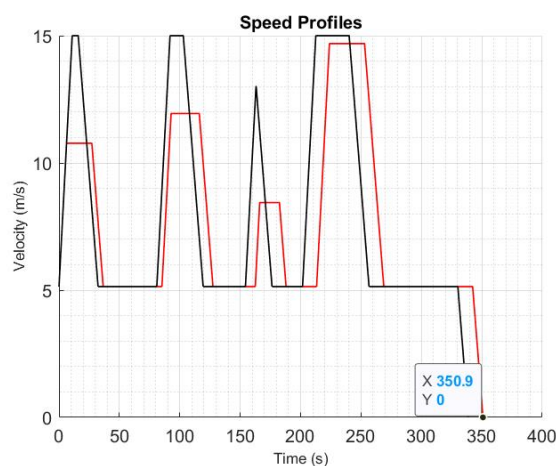


Figura 8.4: Ottimizzazione Consumi Percorso T1-35R, Caso 2. Il profilo nero è ottenuto ipotizzando la velocità di crociera a 15 m/s, il profilo rosso è ottenuto tramite ottimizzazione.

In questo caso il risparmio sul consumo di carburante si attesta attorno al 2.8%. Ne deriva facilmente che anche piccole variazioni nella velocità di crociera generano grandi variazioni nei consumi di carburante, che possono impattare in maniera significativa sui bilanci delle compagnie aeree.

SCENARIO/EMISSIONI	Consumo (kg)	Emissioni		
		CO (g)	HC (g)	NOx (g)
Non Ottimizzato 15m/s	96.19	2376.7	391.2	564.0
Ottimizzazione Cons.	93.50	2582.1	427.4	499.3
	-2.8%	+8.6%	+9.3%	-11.5%

Tabella 8.10: Confronto tra Scenario Consumo Ottimo e Scenario non Ottimizzato, Caso 2

Ottimizzazione delle Emissioni di CO e HC

L'ottimizzazione delle emissioni di CO e HC corrisponde al profilo con velocità di crociera massima. Rispetto allo scenario con velocità di crociera 15m/s, lo schema di ottimizzazione riporta i risultati enunciati nella tabella sottostante, dove è evidenziato il vantaggio ottenuto tramite l'applicazione dell'algoritmo. La diminuzione delle emissioni si attesta attorno al 25%

SCENARIO/EMISSIONI	Consumo (kg)	Emissioni		
		CO (g)	HC (g)	NOx (g)
Non Ottimizzato 8m/s	100.4	3153	525	468.1
Ottimizzazione CO e HC	96.2	2376	391	564.0
	-4.2%	-24.6%	-25.5%	+20.5%

Tabella 8.11: Confronto tra Scenario Consumo Ottimo e Scenario non Ottimizzato, Caso 1

Ottimizzazione delle Emissioni di NOx

L'ottimizzazione dell'emissione degli NOx, dato che la produzione dell'inquinante è favorita dai regimi di alte potenze, si attesta a velocità più basse rispetto alle ottimizzazioni precedenti, come evidenziato dal profilo in Figura 8.5. La Tabella 8.12 evidenzia il miglioramento del valore delle emissioni.

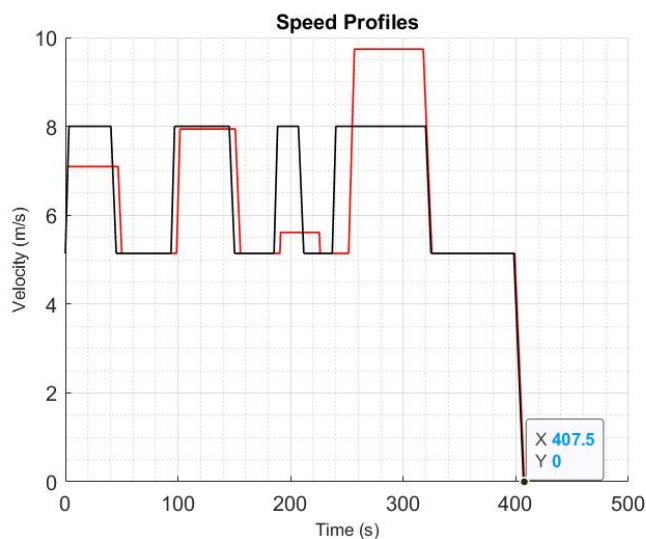


Figura 8.5: Ottimizzazione Emissioni NOx Percorso T1-35R. Il profilo nero è ottenuto ipotizzando la velocità di crociera, il profilo rosso è ottenuto tramite ottimizzazione.

SCENARIO/EMISSIONI	Consumo (kg)	Emissioni		
		CO (g)	HC (g)	NOx (g)
Non Ottimizzato 8m/s	100.4	3153.3	525.0	468.1
Ottimizzazione NOx	99.8	3166	527.5	459.1
	-0.6%	+0.4%	+0.5%	-1.9%

Tabella 8.12: Confronto tra Scenario Emissioni NOx Ottimo e Scenario non Ottimizzato

8.3.2 Percorso T2-Runway 35R

Sul percorso riportato in Figura 8.2 (b) si simula lo stesso processo per i 4 parametri possibili, come fatto al paragrafo precedente.

Ottimizzazione del Consumo di Carburante

Per brevità della trattazione e per similitudine con la valutazione del percorso T1-Runway 35R espresso al Paragrafo 8.3.1, si riporta la tabella che riassume i risultati ottenuti:

SCENARIO/EMISSIONI	Consumo (kg)	Emissioni		
		CO (g)	HC (g)	NO _x (g)
Non Ottimizzato 8m/s	92.63	3086.9	515.2	399.4
Ottimizzazione Cons.	65.84	2002.8	333.0	318.3
	-28.9%	-35.1%	-35.4%	-20.3%

Tabella 8.13: Confronto tra Scenario Consumo Ottimo e Scenario non Ottimizzato, Caso 1

La diminuzione potenziale dei consumi risulta del 28.9%

Ottimizzazione delle Emissioni di CO e HC

SCENARIO/EMISSIONI	Consumo (kg)	Emissioni		
		CO (g)	HC (g)	NO _x (g)
Non Ottimizzato 8m/s	92.63	3086.9	515.2	399.4
Ottimizzazione CO e HC	65.84	2002.8	333.0	318.3
	-28.9%	-35.1%	-35.4%	-20.3%

Tabella 8.14: Confronto tra Scenario Consumo Ottimo e Scenario non Ottimizzato, Caso 1

Dove, per effetto delle alte velocità di crociera, la diminuzione delle emissioni di CO e HC si attesta attorno al 35%.

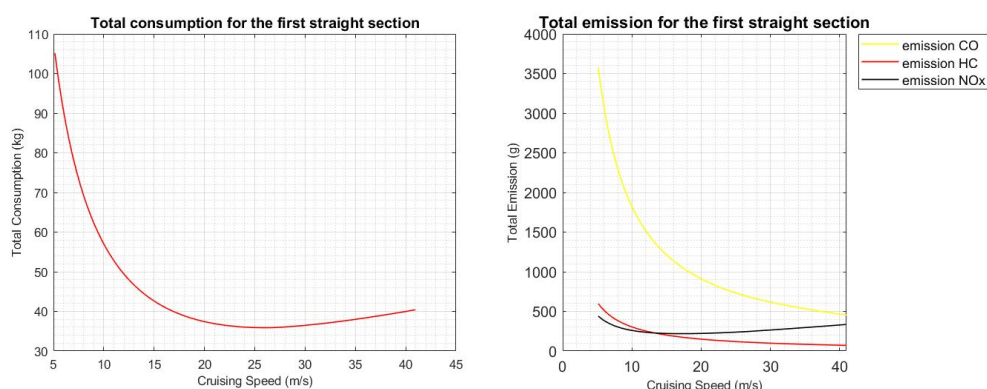
Ottimizzazione delle Emissioni di NOx

SCENARIO/EMISSIONI	Consumo (kg)	Emissioni		
		CO (g)	HC (g)	NOx (g)
Non Ottimizzato 8m/s	92.63	3086.9	515.2	399.4
Ottimizzazione NOx	65.84	2002.8	333.0	318.3
	-28.9%	-35.1%	-35.4%	-20.3%

Tabella 8.15: Confronto tra Scenario Emissioni NOx Ottimo e Scenario non Ottimizzato

Lo scenario di ottimizzazione appena descritto genera un miglioramento generale di tutti i parametri di emissione e consumi. Esso è dovuto al fatto che una velocità di crociera di 8 m/s per i motori considerati è situata alla sinistra del punto di ottimo sia per il consumo di carburante che per i valori degli indici di emissione. La procedura di ottimizzazione, producendo il valore di velocità corrispondente alla configurazione di spinta del punto di ottimo legato al carburante o alle emissioni NOx, si dispone sempre in corrispondenza della velocità massima consentita di 15 m/s.

Questa configurazione delle curve di emissione è dovuta alla grande lunghezza della taxiway Charlie.



(a) Valori di Emissione sulla Taxiway Charlie (b) Valori delle emissioni totali sulla Taxiway Charlie

Figura 8.6: Grafici di Ottimo relativi al Percorso T2-35R

La sua lunghezza di 2.3 km orienta la soluzione verso la velocità di crociera più alta. Come è visibile dai grafici in Figura 8.6 , il limite di velocità di 15 m/s è ancora distante dal punto di ottimo e presenta ancora ampi margini di ottimizzazione.

A titolo informativo, si simula uno scenario di ottimizzazione consumi rimuovendo il limite di velocità raggiungibile a 15 m/s, ottenendo i risultati evidenziati in Tabella 8.16. La velocità di crociera ottima del tratto rettilineo risulta essere di 26.3 m/s.

Dallo scenario appena simulato è evidente il grande margine di ottimizzazione delle procedure di rullaggio, vincolato però al limite di velocità imposto per taxiway di linea.

Ne deriva che una delle proposte principali derivanti dai risultati di questa tesi riguarda la possibilità di incrementare i limiti di velocità in corrispondenza della Taxiway Charlie per ottenere valori di notevole importanza per la riduzione dell'impatto ambientale della fase di circolazione a terra.

Nell'ottica di un incremento di velocità oltre il limite di 15 m/s, si riporta al Paragrafo 6.6, dove viene definita la variazione dinamica della lunghezza delle sezioni per accomodare l'incremento localizzato delle velocità.

SCENARIO/EMISSIONI	Consumo (kg)	Emissioni		
		CO (g)	HC (g)	NO _x (g)
Non Ottimizzato 8m/s	92.63	3086.9	515.2	399.4
Ottimizzazione Cons.	59.38	1501.9	247.5	342.0
	-35.9%	-51.3%	-52.0%	-14.4%

Tabella 8.16: Scenario Ottimizzazione Consumi senza Limite di Velocità

8.3.3 Percorso T2-Runway 35L

Sul percorso riportato in Figura 8.2 (c) si simula il processo di simulazione per i 4 parametri possibili, come fatto per i paragrafi precedenti.

Ottimizzazione del Consumo di Carburante

Per brevità della trattazione e per similitudine con la valutazione del percorso T1-Runway 35R espresso al Paragrafo 8.3.1, si riporta la tabella che riassume i risultati ottenuti:

SCENARIO/EMISSIONI	Consumo	Emissioni		
	(kg)	CO (g)	HC (g)	NOx (g)
Non Ottimizzato 8m/s	102.6	3428.2	572.3	440.7
Ottimizzazione Cons.	69.20	2121.1	352.8	331.6
	-32.6%	-38.1%	-38.3%	-24.7%

Tabella 8.17: Confronto tra Scenario Consumo Ottimo e Scenario non Ottimizzato

Ottimizzazione delle Emissioni di CO e HC

La tabella, per effetto della lunghezza della taxiway Charlie e della posizione del punto di ottimo in una velocità maggiore di quella ammissibile, come trattato al Paragrafo 8.3.2, risulta uguale a quella relativa all'ottimizzazione dei consumi.

Ottimizzazione delle Emissioni di NOx

La tabella, per effetto della lunghezza della taxiway Charlie e della posizione del punto di ottimo in una velocità maggiore di quella ammissibile, come trattato al Paragrafo 8.3.2, risulta uguale a quella relativa all'ottimizzazione dei consumi.

8.4 Tabelle Riassuntive

Dalla trattazione condotta in questo capitolo, siamo dunque in grado di stimare l'effettivo impatto dell'applicazione dell'Active Routing, andando a considerare la quantità di movimenti espressi nel Paragrafo 8.2 e il risparmio per ogni movimento come riportato al Paragrafo 8.3.

Per ognuno dei percorsi, lo scenario di riferimento considerato è quello con velocità di crociera di ogni tratto rettilineo uguale a 8 m/s.

PERCORSO	RISPARMIO POTENZIALE ANNUALE			
	Ottimizzazione Consumi	Ottimizzazione Emissioni		
	(Ton)	CO (Ton)	HC (Ton)	NOx (Kg)
T1-Runway35R	121.9 -6.9%	13.73 -24.6%	2.37 -25.5%	159 -1.9
T2-Runway35R	246.4 -28.9%	9.97 -35.1%	1.68 -35.4%	746 -20.3
T2-Runway35L	224.3 -32.6%	8.78 -38.1%	1.48 -38.4%	733 -24.8
Risparmio totale	592.6 -17.9%	32.48 -30.3%	5.53 -30.9%	1638 -11.0%

Tabella 8.18: Risparmio Potenziale Annuale nei diversi scenari di ottimizzazione

La differenza tra i valori di consumi ed emissioni nei diversi scenari e per ogni percorso sono stati calcolati e moltiplicati per il numero di movimenti l'anno previsti per il percorso considerato come espresso in Tabella 8.8.

Inoltre, sono riportati i miglioramenti percentuali.

Viene dunque ricavato il risparmio totale annuale, sia in misura assoluta che percentuale, rispetto allo scenario "sperimentale", a velocità massima di taxi 8 m/s.

Per il calcolo del valore percentuale totale si estraggono i dati dalle tabelle

precedenti:

$$\%Tot_i = \frac{Opt_{1i} * NMov_1 + Opt_{2i} * NMov_2 + Opt_{3i} * NMov_3}{NonOpt_{1i} * NMov_1 + NonOpt_{2i} * NMov_2 + NonOpt_{3i} * NMov_3} \quad (8.1)$$

Dove:

i = Scenario di ottimizzazione considerato, se consumi, CO, HC o NOx
($i = 1, 4$),

Opt_{1i} = Valore del parametro ottimizzato per il percorso T1-Runway 35R,

Opt_{2i} = Valore del parametro ottimizzato per il percorso T2-Runway 35R,

Opt_{3i} = Valore del parametro ottimizzato per il percorso T2-Runway 35L,

$NMov$ = Numero di movimenti aerei annuali considerati per il percorso,

$NonOpt_{1i}$ = Valore del parametro non ottimizzato per il percorso T1-Runway 35R,

$NonOpt_{2i}$ = Valore del parametro non ottimizzato per il percorso T2-Runway 35R,

$NonOpt_{3i}$ = Valore del parametro non ottimizzato per il percorso T2-Runway 35L,

Vengono inoltre riportate le velocità massime raggiunte su ogni percorso con l'applicazione dell'algoritmo. Come precedentemente trattato, la velocità in corrispondenza della Taxiway Charlie tende al limite massimo.

PERCORSO	VELOCITÀ MASSIME SCENARI			
	Ottimizzazione Consumi	Ottimizzazione Emissioni		
	(m/s)	CO(m/s)	HC(m/s)	NOx(m/s)
T1-Runway35R	14.7	15.0	15.0	9.7
T2-Runway35R	15.0	15.0	15.0	15.0
T2-Runway35L	15.0	15.0	15.0	15.0

Tabella 8.19: Velocità Massime Raggiunte per ogni Scenario

Per completezza della trattazione, vengono riportati i valori di velocità massime in mancanza dei limiti di velocità. I risultati riportati nella tabella seguente portano alla proposta che è formalizzata al paragrafo seguente. Un aumento della velocità ammissibile genererebbe un risparmio di carburante ed emissioni ancora maggiore.

PERCORSO	VELOCITÀ MASSIME SCENARI			
	Ottimizzazione Consumi	Ottimizzazione Emissioni		
	(m/s)	CO(m/s)	HC(m/s)	NOx(m/s)
T1-Runway35R	14.7	22.8	22.8	9.7
T2-Runway35R	26.3	41	41	17.3
T2-Runway35L	26.8	44.6	44.6	18.6

Tabella 8.20: Velocità Massime Raggiunte per ogni Scenario senza limite di velocità

Dalla Tabella 8.19 sembrerebbe che l'algoritmo qui sviluppato porti alla definizione di una velocità quasi sempre coincidente con quella massima. Vale la pena ricordare che la velocità di crociera massima si ottiene sul rettilo più lungo, mentre le velocità di crociera associate agli altri rettili componenti il percorso possono essere notevolmente minori. Inoltre, la velocità consigliata cambia in misura non trascurabile al dipendere dell'aeroplano in rullaggio.

8.5 Formulazione Proposta per la Taxiway Charlie

Dalla trattazione delle tabelle riassuntive è evidente che un incremento delle velocità di percorrenza della Taxiway Charlie causerebbe dei valori di risparmio ancora maggiori di quelli ottenuti nelle precedenti tabelle.

L'incremento richiesto per l'ottimizzazione dei consumi si attesta attorno ai 36 km/h (10 m/s) per l'aeromobile considerato.

Viene dunque simulato uno scenario con velocità massima impostata a 25 m/s (molto vicina al valore di ottimo di 26.3 m/s) sul percorso T2-Runway 35R, e se ne calcola l'incremento teorico a livello di prestazioni rispetto al limite di velocità di 15 m/s.

PERCORSO T2-35R	Cons.(kg)	CO(g)	HC(g)	NOx(g)
Limite 15m/s	65.84	2002.8	333.0	318.3
Ott. Carburante new	59.44 -9.7%	1540.9 -23.1%	254.2 -23.6%	335.5 +5.4%
Ott. NOx new	63.04 -4.2%	1854.5 -7.4%	307.9 -7.5%	316.2 -0.7%

Tabella 8.21: Tabella di confronto delle emissioni tra i diversi scenari di ottimizzazione per Airbus A380.

PERCORSO	VELOCITÀ MASSIME SCENARI			
	Ottimizzazione Consumi	Ottimizzazione Emissioni		
	(m/s)	CO(m/s)	HC(m/s)	NOx(m/s)
T2-Runway35R	25	25	25	17.3

Tabella 8.22: Velocità Ottime per i 4 Scenari con limite di velocità impostato a 25 m/s

Dai calcoli riportati risulta che un incremento del limite della velocità di percorrenza sulla Taxiway Charlie possa andare a migliorare i parametri considerati, ottenendo un potenziale risparmio ulteriore (rispetto all'ottimizzazione precedente) del 10% sul carburante impiegato, del 23% sulle emissioni

di incombusti e dell'1% sulle emissioni di NOx.

Per i valori di velocità degli scenari di ottimizzazione CO e HC, si ottiene ancora una volta il valore di velocità massima.

Questo si ha in relazione al fatto che l'emissione di questi inquinanti si riduce all'aumentare della potenza di funzionamento dei motori, ottenendo dei valori di velocità tecnicamente non implementabili.

Fattibilità Tecnica, Lato Infrastruttura

Per velocità maggiori di 54 km/h (15 m/s), la procedura di concatenazione delle sezioni descritta al Paragrafo 6.6 sarebbe adottata, per garantire i corretti distanziamenti durante la fase di circolazione.

L'integrazione del sistema di Active Routing con la programmazione delle curve di sicurezza (Paragrafo A.2), al variare dello spazio di frenatura disponibile, permetterebbe il mantenimento della sicurezza in ogni momento.

I pannelli informativi descritti al Paragrafo 6.4.1 garantiscono la prescrizione delle diverse velocità di rullaggio per ogni movimento, come indicato in Tabella 8.22.

La fattibilità tecnica dal lato veicolo esula dagli obiettivi di questa tesi.

Capitolo 9

Conclusioni

Questo lavoro di tesi costruisce uno schema operativo in grado di automatizzare la comunicazione aeroportuale per migliorare la capacità operativa dell'aeroporto.

Il sistema proposto presenta il principale vantaggio di sfruttare tecnologie consolidate attraverso uno schema concettualmente implementabile da subito, con costi relativamente bassi rispetto alle implementazioni più all'avanguardia descritte nella trattazione dello stato dell'arte.

Il concetto di sezioni di blocco automatiche, solo introdotto per taxiway parallele e descritto tecnologicamente dagli studi di Marchionni [32] viene in questa tesi:

- Implementato su tutta la superficie aeroportuale
- Configurato affinché sia in grado di cooperare con il controllore di volo tramite un'interfaccia dedicata
- Arricchito nella fase di controllo adottando le curve di sicurezza, per costruire un sistema automatico di prevenzione e risoluzione dei conflitti e delle precedenza, assolvendo alle funzioni di RMCA, CATCC e CMAC.

Parallelamente all'implementazione del sistema a blocchi, viene definito un sistema innovativo di Active Routing per la regolazione in tempo reale delle velocità di rullaggio con un codice Matlab sviluppato ad-hoc, ancora assente dal mercato A-SMGCS e limitato alla ricerca accademica.

La procedura sviluppata è pensata per la circolazione in linea in orari di morbida ed è simulata a meno delle fasce orarie di punta (10-12, 17-19).

L'algoritmo è sviluppato per tenere conto di qualunque tipo di aeromobile, gestendo i dati tecnici e geometrici di input dal sistema A-CDM, cambiando a seconda del motore considerato per ottimizzarne le prestazioni.

Dalle simulazioni condotte si ottiene, in funzione della politica adottata, una riduzione del carburante consumato di circa il 18%, delle emissioni di HC e CO del 30% o delle emissioni di NOx dell'11%.

Le velocità ottime ottenute consigliano l'adozione degli Advanced Visual Docking Guidance Systems di prescrizione per velivoli in rullaggio sulla taxiway Hotel. La taxiway Charlie, alla luce di una velocità di percorrenza massima di 30 nodi, non presenta invece una variabilità di velocità consigliate tali da giustificare l'adozione dei A-VDGS. La simulazione tuttavia suggerisce l'incremento dei limiti di velocità, quantificando il potenziale guadagno i termini di emissioni e consumi in Tabella 8.21 .

Per concludere, si vuole ricordare come la tematica della capacità aeroportuale e dei costi connessi alla circolazione degli aeromobili siano di fondamentale importanza nell'ottica degli equilibri di mercato dei sistemi di trasporto aereo.

Difatti, in una situazione in cui la domanda di capacità aeroportuale supera l'offerta ed in cui l'aeroporto si trova in una posizione di sostanziale potere di mercato nel traffico passeggeri, i prezzi vengono utilizzati per bilanciare il livello della domanda con la capacità disponibile.

Se i prezzi degli slot aeroportuali, per effetto della scarsa capacità specialmente in ore di punta, si riflettono in tariffe più elevate e quindi in costi più elevati per le compagnie aeree, queste a loro volta in base alla situazione del mercato praticheranno tariffe più alte ai loro passeggeri. In pratica, questi ultimi sono destinati a pagare sempre di più l'insufficiente capacità aeroportuale.

In quest'ottica, i sistemi A-SMGCS, oggetto principale di questa tesi, giocano un ruolo fondamentale nel ridurre l'impatto negativo delle carenze di capacità sui clienti del servizio di trasporto, favorendo la concorrenza e dunque l'accessibilità del servizio stesso.

Futuri sviluppi

Lo studio oggetto di questa tesi si pone come valutazione ancora preliminare di implementazione di un sistema a blocchi. Una validazione del modello proposto tramite un cross-check dei dati di consumi delle compagnie aeree costituisce un passaggio fondamentale da intraprendere nel prossimo futuro, così come su una campagna di rilevamento delle velocità e dei passaggi sulle taxiway per poter stimare con precisione l'efficienza dell'algoritmo.

Ulteriori sviluppi si concentreranno inoltre sulla quantificazione dell'incremento di capacità operativa aeroportuale, tramite opportuni software di simulazione.

Per l'implementazione della HMI sarà inoltre richiesta una stima rigorosa dei tempi di reazione dei controllori di volo. Inoltre, particolare attenzione dovrà essere rivolta alla determinazione di un algoritmo in grado di prevedere il TOT (Target Take-Off Time), nell'ottica di ritardare, quando necessario, la partenza degli aeromobili dalla piazzola di sosta per ottimizzare l'organizzazione della circolazione.

Appendice A

L'Odierna Gestione del Sistema a 4 Fasi

Per la valutazione dell'odierno stato delle tecnologie di circolazione a terra per Milano Malpensa si cita il report sulle condizioni del progetto Local Single Sky Implementation. [15] L'agenzia europea per la sicurezza del traffico aereo esamina gli obiettivi posti dagli enti internazionali e ne riporta lo stato di avanzamento a livello europeo. Il report per la situazione italiana prende in esame alcuni degli aeroporti italiani più trafficati come Roma, Venezia e Milano.

Nel report si valutano i gradi di implementazione di diverse tecnologie, riguardanti la circolazione aerea nel suo complesso, dallo stazionamento fino alla fase di volo. Per utilità della trattazione, sono riportati gli obiettivi corrispondenti ai principali argomenti di questa tesi, per analizzare lo stato odierno delle tecnologie e la mole degli investimenti in atto per l'innovazione delle tecniche.

Nonostante non sia più in vigore, nell'Appendice B è citato il concetto di livelli di implementazione espresso nei documenti qui riportati, di modo da meglio comprendere la struttura del documento analizzato.

A.1 Sorveglianza

Le principali caratteristiche da soddisfare per ottenere la certificazione EUROCONTROL sono:

- Provvedere informazioni di traffico, identità, posizione e velocità.

AOP04.1	Advanced Surface Movement Guidance and Control System A-SMGCS Surveillance (former Level 1) Timescales: Initial operational capability: 01/01/2007 Full operational capability: 31/12/2011		61%	Ongoing
LIMC - Milano Malpensa Airport				
ENAV has installed the required surveillance equipment. Training is ongoing and procedures waiting for approval. SEA has plans to install Mode S transponders. The implementation is in line with Regulation 716/2014 requirements and deadlines.				31/12/2020
REG (By:12/2010)				
ENAC	ENAC has activated a dedicated working group	-	100%	Completed
ASP (By:12/2011)				
ENAV	ENAV has installed the required surveillance equipment. Training is ongoing and procedures waiting for approval	A-SMGCS Level 1 & 2 and safety nets integration / Airport System Upgrade	55%	Ongoing 31/12/2019
APO (By:12/2010)				
SEA - Aeroporti di Milano	SEA has planned to install Mode S transponder on ground vehicles	-	40%	Ongoing 31/12/2020

Figura A.1: Stato delle Tecnologie di Sorveglianza per Milano Malpensa

- Sensori “Cooperative” (ADS-B, SSR) oppure “non Cooperative” (SMR, PSR...)
- Equipaggiamento trasmettente e ricevitore sui veicoli in piazzola
- Human-Machine Interface

Le procedure per l'implementazione di una sorveglianza completamente automatica sono dunque in via di definizione. SEA ha già pianificato l'installazione dei Transponder S sui veicoli in movimento nelle piazzole, di modo da integrare ogni tipo di veicolo nel processo di identificazione. È già stato implementato il Surface Movement Radar.

A.2 Controllo

Le caratteristiche da soddisfare sono:

- Algoritmi di prevenzione, rilevamento e allerta dei conflitti (RMAC ecc...)
- Human Machine Interface
- Sistema di controllo sulle clearance concesse dai controllori di volo (CATCC)

AOP04.2	Advanced Surface Movement Guidance and Control System (A-SMGCS) Runway Monitoring and Conflict Alerting (RMCA) (former Level 2) Timescales: Initial operational capability: 01/01/2007 Full operational capability: 31/12/2017		44%	Ongoing
LIMC - Milano Malpensa Airport				
A-SMGCS Restricted Area Alert and Conflict Clearances will be implemented within PCP regulatory framework				31/12/2020
ASP (By:12/2017)				
ENAV	ENAV will implement A-SMGCS Restricted Area Alert and Conflict Clearances	A-SMGCS Level 1 & 2 and safety nets integration	55%	Ongoing 31/12/2019
APO (By:12/2017)				
SEA - Aeroporti di Milano	SEA has implemented the Runway Incursion Prevention Control Alerting System and is waiting for related technical specification	-	10%	Ongoing 31/12/2020

Figura A.2: Stato delle Tecnologie di Controllo per Milano Malpensa, RMCA

AOP12	Improve Runway and Airfield Safety with Conflicting ATC Clearances (CATC) Detection and Conformance Monitoring Alerts for Controllers (CMAC) Timescales: Initial operational capability: 01/01/2015 Full operational capability: 31/12/2020		59%	Ongoing
LIMC - Milano Malpensa Airport				
Conflicting ATC Clearances (CATC) will be implemented according to PCP regulatory framework				31/12/2019
ASP (By:12/2020)				
ENAV	ENAV has plans to implement Conflicting ATC Clearances (CATC) but there's no plan yet for Conformance Monitoring Alerts for Controllers (CMAC).	A-SMGCS Level 1 & 2 and safety nets integration	45%	Ongoing 31/12/2019
APO (By:12/2020)				
SEA - Aeroporti di Milano	Monitoring of clearances and phraseology is already in place	-	100%	Completed -

Figura A.3: Stato delle Tecnologie di Controllo per Milano Malpensa, CATCC e CMAC

- Adozione della CMAC

Malpensa risulta aver implementato il Runway Monitoring and Conflict Analysis. L'aeroporto ha inoltre un programma CATCC, ma manca ancora della pianificazione per un meccanismo CMAC.

A.3 Routing

A livello normativo, l'ENAV ancora non ha programmato un'implementazione di Routing Automatico. Al giorno d'oggi la fase di Routing risulta sempre affidata ai controllori di volo che, come specificato nei paragrafi precedenti, comunicano via radio e seguono dei percorsi standard a terra.

Allo stesso modo, ancora non è stata presa in considerazione l'ipotesi della Remote Tower. Requisito fondamentale per l'implementazione di questa tec-

AOP13	Automated Assistance to Controller for Surface Movement Planning and Routing <i>Timescales:</i> Initial operational capability: 01/01/2016 Full operational capability: 31/12/2023		0%	Not yet planned
LIMC - Milano Malpensa Airport				
ENAV has no plan yet for this functionality. Regulator's actions will be eventually undertaken after ENAV implementation actions				-
REG (By:12/2023)				
ENAC	Regulator's actions will be eventually undertaken after ENAV implementation actions	-	0%	Not yet planned
ASP (By:12/2023)				
ENAV	ENAV has no plan yet for this functionality. The deployment status and planning of this implementation objective as related to the Pilot Common Project is redundant because it is also provided to the SESAR Deployment Manager and included in the Deployment Programme Monitoring View.	-	0%	Not yet planned

Figura A.4: Stato delle Tecnologie di Routing per Milano Malpensa

AOP14	Remote Tower Services <i>Applicability and timescale: Local</i>		0%	Not yet planned
LIIR - ENAV S.P.A - ITALIAN AGENCY FOR AIR NAVIGATION SERVICES				
ENAV is currently evaluating the opportunities to implement Remote Tower within national borders. At present no plan has been developed				-
ATC18	Multi-Sector Planning En-route - 1P2T <i>Applicability and timescale: Local</i>		100%	Completed
-				
ENAV Systems support single multi-planner role associated to two adjacent tactical roles and procedures and working methods have been developed to cater for enhanced multi-planner needs. Multi-sector planner concept is in operational use in the following ENAV operational environment: - En-Route sectors: Rome ACC; - Terminal sectors: Milano ACC and Roma ACC - Approach unit: Bologna APP				-
ENV02	Airport Collaborative Environmental Management <i>Applicability and timescale: Local</i>		100%	Completed
LIMC - Milano Malpensa Airport				
With reference to noise emission, Italian legislation envisages airport commissions, chaired by ENAC, to which ENAV participates with an advisory role. SEA makes use of Airport Collaborative Decision Making process, which contributes to improving efficiency of airport operations thus bringing advantages also in terms of reduced fuel consumption and, potentially, noise emission. Moreover, in the framework of ENAV's Flight Efficiency Plan, the environmental effect of aircraft operations is part of the continuous training courses for ATCOs and courses for ATCOs students at ENAV Academy.				-

Figura A.5: Stato delle Tecnologie legate alla fase di Routing per Milano Malpensa

nologia è l'implementazione totale dei servizi di sorveglianza e controllo, in quanto non sarebbe più possibile controllare visivamente l'infrastruttura di volo.

A.4 Guidance

Riguardo la Guidance, non è stato implementato e non è in via di implementazione il meccanismo “Follow The Greens”, che al momento risulta essere il più diffuso al mondo per la Guidance automatica. Per la sua adozione si richiede un meccanismo di sorveglianza e controllo totalmente implementato. Il sistema inoltre trarrebbe beneficio da un algoritmo di Routing, sebbene possa anche essere azionato manualmente dal controllore di volo. La possibilità di una Guidance con dispositivo On-Board non è ancora stata presa in considerazione a livello internazionale.

A.5 A-CDM

La procedura A-CDM, come specificato nel 4.2, risulta essere implementata ed al momento operante a piena capacità.

AOP05	Airport Collaborative Decision Making (A-CDM) Timescales: Initial operational capability: 01/01/2004 Full operational capability: 31/12/2016		100%	Completed
LIMC - Milano Malpensa Airport				
Airport management system services are implemented, provided by ANSP and AO in a coordinated way, each for its own remit. The full CDM implementation has been finalised				
ASP (By:12/2016)				
ENAV	Airport management system services are implemented, provided by ANSP and AO in a coordinated way, each for its own remit.	-	100%	Completed
APO (By:12/2016)				
SEA - Aeroporti di Milano	Today airport management system services are implemented, provided by ANSP and AO in a coordinated way within one's remit	-	100%	Completed

Figura A.6: Stato delle Tecnologie A-CDM per Milano Malpensa

A.6 Impatto Ambientale

La valutazione dell'impatto ambientale di un aeroporto è prevalentemente condotta sulle influenze delle emissioni sonore nell'area circostante. Il seguente report si pone come obiettivo quello di valutare, oltre al contributo di rumore, anche quello apportato dalla combustione del carburante di volo. In ogni modo, la valutazione EUROCONTROL rispetto all'inquinamento rumoroso classifica l'aeroporto a piena capacità operativa (100%)

AOP14	Remote Tower Services <i>Applicability and timescale: Local</i>	0%	Not yet planned
LIR - ENAV S.P.A - ITALIAN AGENCY FOR AIR NAVIGATION SERVICES			
ENAV is currently evaluating the opportunities to implement Remote Tower within national borders. At present no plan has been developed			-
ATC18	Multi-Sector Planning En-route - 1P2T <i>Applicability and timescale: Local</i>	100%	Completed
-			
ENAV Systems support single multi-planner role associated to two adjacent tactical roles and procedures and working methods have been developed to cater for enhanced multi-planner needs. Multi-sector planner concept is in operational use in the following ENAV operational environment: - En-Route sectors: Rome ACC; - Terminal sectors: Milano ACC and Roma ACC - Approach unit: Bologna APP			-
ENV02	Airport Collaborative Environmental Management <i>Applicability and timescale: Local</i>	100%	Completed
LIMC - Milano Malpensa Airport			
With reference to noise emission, Italian legislation envisages airport commissions, chaired by ENAC, to which ENAV participates with an advisory role. SEA makes use of Airport Collaborative Decision Making process, which contributes to improving efficiency of airport operations thus bringing advantages also in terms of reduced fuel consumption and, potentially, noise emission. Moreover, in the framework of ENAV's Flight Efficiency Plan, the environmental effect of aircraft operations is part of the continuous training courses for ATCOs and courses for ATCOs students at ENAV Academy.			-

Figura A.7: Misure Adottate in Merito all'Impatto Ambientale per Milano Malpensa

Appendice B

Livelli di Implementazione A-SMGCS

Di seguito i livelli di implementazione come riportati dal manuale (ICAO, 2004). Sebbene obsoleti, sono utili per la comprensione dei documenti redatti fino al 2018.

User	Surveillance	Control			Routing	Guidance				
		Conflict prediction and/or detection	Conflict analysis	Conflict resolution		Ground				On board
						*1	*2	*3	*4	
Controller	X	X	X	X	X					
Pilot/Vehicle driver		X	X	X		X				
System										

Figura B.1: Livello 1: Il sistema è assente, la comunicazione radio è quella tradizionale

User	Surveillance	Control			Routing	Guidance				
		Conflict prediction and/or detection	Conflict analysis	Conflict resolution		Ground				On board
Controller	X	X	X	X	X					
Pilot/Vehicle driver		X	X	X		X	X			
System	X	X								

Figura B.2: Livello 2: Il sistema provvede alla localizzazione degli aeromobili e a controlli di sicurezza elementari

User	Surveillance	Control			Routing	Guidance				
		Conflict prediction and/or detection	Conflict analysis	Conflict resolution		Ground				On board
						#1	#2	#3	#4	
Controller		X	X	X				X		
Pilot/Vehicle driver		X	X ¹⁾	X ¹⁾	X					
System	X	X	X	X	X					

Figura B.3: Livello 3: Il sistema analizza i conflitti e genera i percorsi. Il controllore non localizza più i velivoli personalmente.

User	Surveillance	Control			Routing	Guidance				
		Conflict prediction and/or detection	Conflict analysis	Conflict resolution		Ground				On board
Controller		X	X	X						
Pilot/Vehicle driver		X	X ¹⁾	X ¹⁾	X					
System	X	X	X	X	X					X

Figura B.4: Livello 4: Il sistema genera percorsi in automatico e guida l'aeromobile. Il controllore di volo è deputato a funzione di controllo.

User	Surveillance	Control			Routing	Guidance				
		Conflict prediction and/or detection	Conflict analysis	Conflict resolution		Ground				On board
Controller		X	X	X						
Pilot/Vehicle driver					X					X
System	X	X	X	X	X					X

Figura B.5: Livello 5: L'implementazione a bordo del velivolo fa comunicare i sistemi e solleva il pilota dagli oneri di risoluzione dei conflitti.

Appendice C

Low Visibility Operational Map

Viene riportato lo schema presente sul manuale di esercizio aeroportuale riguardante le operazioni in bassa visibilità.

Risulta evidente come la configurazione del sistema A-SMGCS vada a coprire le taxiway che vengono maggiormente utilizzate in condizioni di bassa visibilità, per permettere la sicura fruizione dell'infrastruttura anche in situazioni meteo avverse.

Al giorno d'oggi, le procedure sono così divise:

- I decolli sono effettuati esclusivamente dalla 35R
- Gli atterraggi sono effettuati esclusivamente dalla 35L

In condizioni di visibilità 3, la circolazione è al momento consentita ad un solo aereo per volta.

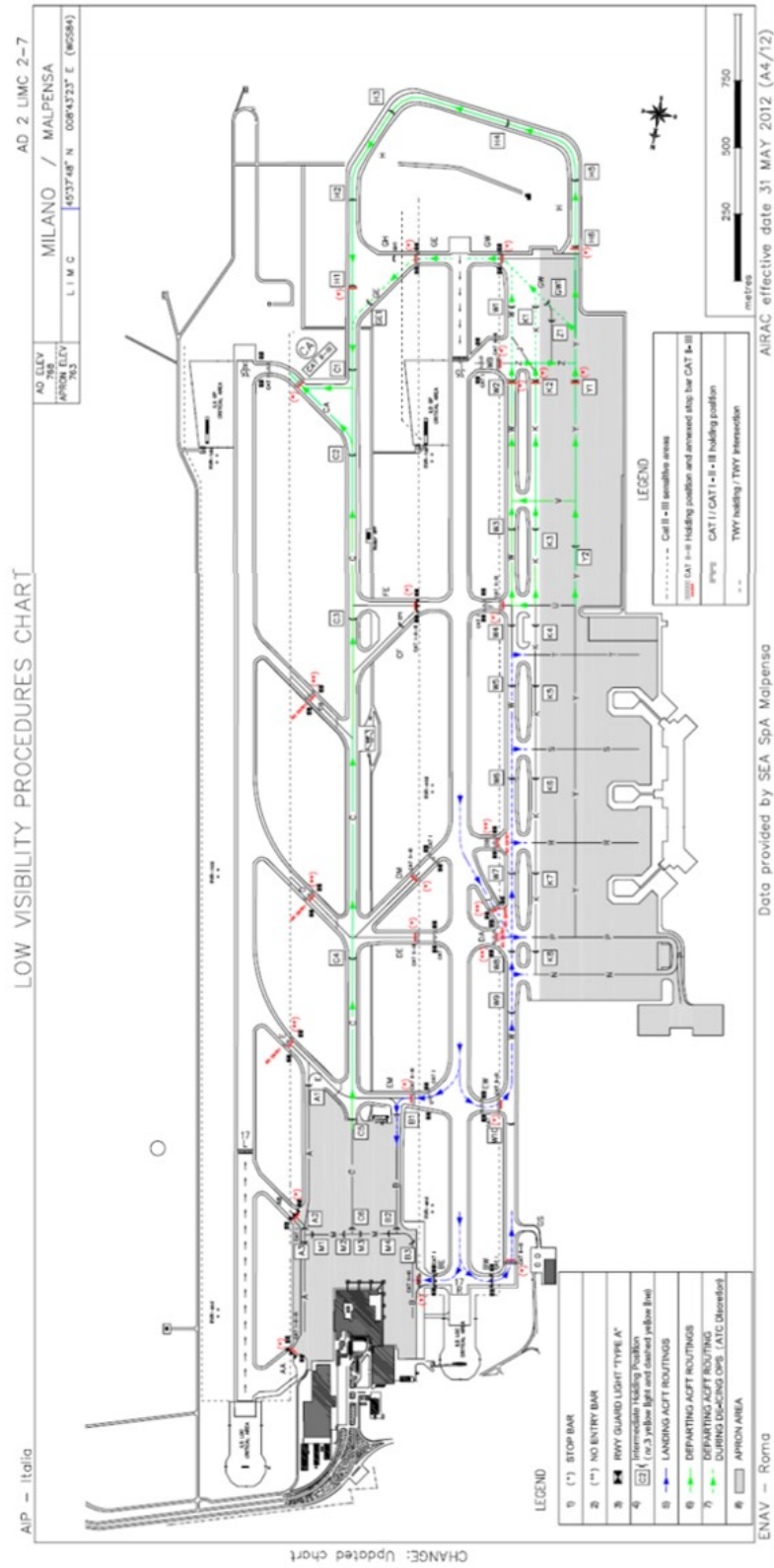


Figura C.1: Schema delle Procedure in Condizioni di Bassa Visibilità

Appendice D

ICAO Engines Database

Viene di seguito riportato il database ICAO (1-130, 520-600), opportunamente filtrato per rappresentare i dati utili alla configurazione dell'algoritmo di Active Routing.

I numeri dei motori riferiti agli aerei utilizzati come riferimento posso essere ritrovati nel database:

- Learjet 35A - TFE731-2-2B (n°1)
- Airbus A320 - CFM56-5C2 (n°92)
- Boeing 737-800 Next Generation - CFM56-7B24 (n°109)
- Airbus A380 - Trent 970-84 (n°552)

N°	Motore	Fuel Flow		Potenza	Emissioni					
		Kg/s		KN	g/Kg					
		7%	30%	max	CO		HC		NO _x	
				7%	30%	7%	30%	7%	30%	
1	TFE731-2-2B	0.024	0.067	15.6	58.6	22.38	20.04	4.26	2.82	5.9
2	TFE731-3	0.026	0.072	16.5	47.7	15.56	9.04	1.41	3.72	6.92
3	AE3007A	0.049	0.117	33.73	17.35	3.28	2.51	0.64	3.83	7.79
4	AE3007A1	0.0461	0.113	34.91	23.73	3.91	3.818	0.655	3.47	7.1
5	AE3007A1	0.0461	0.113	34.91	32.59	1.36	5.04	0.18	3.19	7.2
6	AE3007A1	0.0461	0.113	34.91	39.91	6.72	3.85	0.03	4.17	7.13
7	AE3007A1 series	0.05	0.117	33.73	22.43	3.8	3.1	0.72	3.52	7.22
8	AE3007A1/1	0.0459	0.1125	34.74	23.95	3.93	3.92	0.658	3.46	7.07
9	AE3007A1/1	0.0459	0.1125	34.74	32.84	1.4	5.1	0.18	3.19	7.16
10	AE3007A1/1	0.0459	0.1125	34.74	40.07	6.8	3.88	0.03	4.17	7.12

N°	Motore	Fuel Flow		Potenza	Emissioni					
		Kg/s		KN	g/Kg					
		7%	30%	max	CO		HC		NOx	
				7%	30%	7%	30%	7%	30%	
11	AE3007A1/3	0.0449	0.1077	33.05	25.58	4.21	4.64	0.689	3.39	6.83
12	AE3007A1/3	0.0449	0.1077	33.05	32.4	1.83	5.23	0.21	3.29	6.84
13	AE3007A1/3	0.0449	0.1077	33.05	38.47	7.62	3.81	0.03	4.27	6.93
14	AE3007A1E	0.0475	0.12	37.16	37.97	5.63	3.52	0.03	4.26	7.42
15	AE3007A1P	0.046	0.1126	34.74	23.8	3.93	3.85	0.658	3.47	7.07
16	AE3007A1P	0.046	0.1126	34.74	32.68	1.51	5.06	0.19	3.19	6.89
17	AE3007A1P	0.046	0.1126	34.74	39.97	6.79	3.86	0.03	4.17	7.12
18	AE3007A2	0.055	0.138	42.23	34.17	4.08	1.71	0	4.39	7.9
19	AE3007A3	0.0448	0.1076	33	25.73	4.22	4.705	0.69	3.38	6.83
20	AE3007A3	0.0448	0.1076	33	34.86	2	5.65	0.23	3.18	6.56
21	AE3007A3	0.0448	0.1076	33	41.29	7.65	4.1	0.03	4.12	6.93
22	AE3007C	0.039	0.091	28.6	29.88	4.5	5.84	0.83	3.24	6.63
23	AE3007C	0.0377	0.0943	29.62	26.32	4.28	4.953	0.696	3.36	6.78
24	AE3007C	0.0377	0.0943	29.62	35.07	2.02	5.75	0.23	3.2	6.62
25	AE3007C	0.0377	0.0943	29.62	26.32	4.28	4.953	0.696	3.36	6.78
26	AE3007C1	0.042	0.099	31.5	26.04	3.96	4.84	0.66	3.37	7.05
27	AE3007C1	0.0418	0.0991	31.46	26.04	3.96	4.837	0.661	3.37	7.05
28	AE3007C1	0.0418	0.0991	31.46	36.04	1.62	5.88	0.21	3.14	6.71
29	AE3007C2	0.0472	0.0985	32.73	23.09	1.97	2.57	0.22	3.14	6.56
30	D-30 (Il series)	0.13	0.35	66.64	60.3	14.5	43.6	1.5	3.6	7
31	D-30KP-2	0.21	0.49	117.6	62.4	15.4	13.3	2.7	3.3	6.3
32	D-30KU	0.215	0.5	112.7	54	11.8	10.5	1.2	2.7	5.1
33	D-30KU-154	0.207	0.42	107.5	77.7	18.2	12.7	1.9	2.9	5.1
34	PS-90A	0.178	0.489	156.9	6.9	0.9	0.3	0.2	5.8	11.8
35	PS-90A	0.1675	0.511	154.6	15.18	1.2	1.32	0.79	4.92	8.96
36	PS-90A1	0.174	0.533	169.7	12.91	1.07	0.72	0.16	4.92	9.88
37	PS-90A2	0.171	0.491	156.95	16.79	1.91	2.88	0.21	4.3	9.31
38	BR700-710A1-10	0.089	0.22	65.61	26.09	4.24	1.98	0.04	4	8.2
39	BR700-710A1-10	0.089	0.214	65.61	27.82	4.78	1.09	0.05	4.69	7.68
40	BR700-710A2-20	0.089	0.214	65.61	28	4.81	1.12	0.05	4.67	7.67
41	BR700-710C4-11	0.083	0.215	68.77	31.57	4.92	2.29	0.05	4.5	7.71
42	BR700-715A1-30	0.096	0.245	84.16	16.27	3.76	0.21	0.01	5.37	11.19
43	BR700-715A1-30	0.1	0.24	83.23	19.72	4.05	0.11	0.02	3.95	8.75
44	BR700-715B1-30	0.098	0.259	89.68	15.56	3.38	0.17	0	5.54	11.38
45	BR700-715B1-30	0.103	0.257	89.68	18.6	3.59	0.07	0.02	4.14	9.01
46	BR700-715C1-30	0.101	0.273	95.33	14.86	3.06	0.14	0	5.72	11.55
47	BR700-715C1-30	0.105	0.272	95.33	17.85	3.23	0.06	0.02	4.28	9.23
48	BR700-725A1-12	0.085	0.221	75.7	41.9	5.93	3	0	3.38	7.81
49	BR700-710D5-21	0.08	0.197	68.43	34.97	2.84	2.13	0.01	3.07	9.11
50	CFM56-2A series	0.13	0.318	106.76	23.5	3.4	1.13	0.08	4.3	8.7

N°	Motore	Emissioni								
		Fuel Flow		Potenza	g/Kg					
		Kg/s		KN	CO		HC		NOx	
7%	30%	max	7%	30%	7%	30%	7%	30%		
51	CFM56-2B-1	0.128	0.311	97.86	30.7	4.2	1.83	0.08	4	8.2
52	CFM56-2-C5	0.128	0.311	97.86	30.7	4.2	1.83	0.08	4	8.2
53	CFM56-3-B1	0.114	0.29	89.41	34.4	3.8	2.28	0.08	3.9	8.3
54	CFM56-3B-2	0.119	0.314	98.3	30.1	3.4	1.75	0.073	4.1	8.7
55	CFM56-3C-1	0.124	0.336	104.6	26.8	3.1	1.42	0.07	4.3	9.1
56	CFM56-3C-1 (Rer)	0.111	0.273	82.29	38.1	4.2	2.86	0.08	3.8	8
57	CFM56-5-A1	0.1011	0.291	111.2	17.6	2.5	1.4	0.4	4	8
58	CFM56-5A3	0.1044	0.307	117.88	16.2	2.4	1.3	0.3	4.1	8.3
59	CFM56-5A4	0.095	0.261	97.89	20.3	3.1	1.75	0.5	4.04	8.51
60	CFM56-5A5	0.098	0.276	104.53	18.5	2.8	1.53	0.45	4.29	8.94
61	CFM56-5B1	0.117	0.364	133.45	28.4	1.57	3.21	0.12	4.6	10.8
62	CFM56-5B1/2	0.129	0.369	133.45	34	38.4	1.7	9.1	4.73	7.02
63	CFM56-5B1/2P	0.12	0.37	133.5	36.5	23.1	2.9	3.7	4.1	7.3
64	CFM56-5B1/3	0.109	0.347	133.4	27.92	2.53	1.37	0.05	4.45	9.28
65	CFM56-5B1/P	0.11	0.345	133.45	19.8	2	3.7	0.5	4.5	10.7
66	CFM56-5B2	0.119	0.376	137.9	27.4	1.4	3.04	0.12	4.7	11
67	CFM56-5B2/2	0.131	0.377	137.9	33.7	35.8	1.7	8.4	4.82	7.24
68	CFM56-5B2/2P	0.13	0.39	137.9	35.5	21.4	2.7	3.3	4.2	7.6
69	CFM56-5B2/3	0.111	0.358	137.9	26.72	2.33	1.22	0.05	4.53	9.42
70	CFM56-5B2/P	0.113	0.356	137.9	19.5	1.9	3.6	0.5	4.6	10.9
71	CFM56-5B3/2P	0.13	0.4	142.4	34.5	19.9	2.5	2.9	4.3	7.8
72	CFM56-5B3/3	0.113	0.369	142.3	25.59	2.14	1.1	0.05	4.6	9.56
73	CFM56-5B3/P	0.115	0.366	142.35	19.2	1.7	3.5	0.5	4.7	11.2
74	CFM56-5B4	0.107	0.326	117.9	31.9	2.33	3.87	0.13	4.3	10
75	CFM56-5B4/2	0.121	0.335	117.9	37.1	43.8	2.2	11.4	4.49	6.13
76	CFM56-5B4/2P	0.12	0.34	120.1	40.1	29.1	3.6	5.3	3.9	6.5
77	CFM56-5B4/3	0.102	0.316	120.1	32.07	3.24	1.92	0.05	4.22	8.85
78	CFM56-5B4/P	0.104	0.312	120.11	23.4	2.3	4.6	0.5	4.3	10
79	CFM56-5B5/3	0.092	0.264	97.9	41.77	4.94	3.55	0.08	3.81	8.03
80	CFM56-5B5/P	0.094	0.26	97.89	30	3.4	6.2	0.7	3.8	8.7
81	CFM56-5B6/2	0.111	0.315	104.5	46.1	17.75	3.4	0.2	3.9	10.32
82	CFM56-5B6/2P	0.11	0.31	104.5	44.8	21.5	4.6	0.4	3.6	8.7
83	CFM56-5B6/3	0.095	0.279	104.5	38.39	4.35	2.93	0.07	3.94	8.29
84	CFM56-5B6/P	0.097	0.275	104.53	27.7	2.9	5.5	0.6	4	9.2
85	CFM56-5B7/3	0.102	0.316	120.1	32.07	3.24	1.92	0.05	4.22	8.85
86	CFM56-5B7/P	0.104	0.312	120.11	23.4	2.3	4.6	0.5	4.3	10
87	CFM56-5B8/3	0.091	0.26	96.1	42.82	5.12	3.76	0.08	3.77	7.96
88	CFM56-5B8/P	0.094	0.262	94.7	32.9	3.9	6.5	0.9	3.4	8.4
89	CFM56-5B9/2P	0.105	0.296	102.2	44.1	21	4.4	0.4	3.2	7.6
90	CFM56-5B9/3	0.095	0.278	103.6	38.8	4.42	3.01	0.07	3.92	8.26
91	CFM56-5B9/P	0.098	0.28	102.2	30.4	3.7	5.9	0.8	3.6	8.8
92	CFM56-5C2	0.1175	0.3558	138.78	34	1.75	5.68	0.082	4.19	10
93	CFM56-5C2/P	0.109	0.342	137.61	35.1	2.1	5.8	0	3.9	9.3
94	CFM56-5C3	0.1203	0.37	144.57	32.6	1.57	5.35	0.074	4.26	10.4
95	CFM56-5C3/P	0.112	0.355	143.33	33.4	1.9	5.4	0	4	9.6
96	CFM56-5C4	0.124	0.386	151.25	30.93	1.4	5	0.065	4.28	10.67
97	CFM56-5C4/P	0.115	0.37	149.9	31.6	1.6	5	0	4.1	9.9
98	CFM56-7B18	0.097	0.26	86.74	28.3	3.6	3.5	0.1	4.3	9.1
99	CFM56-7B18/3	0.092	0.256	86.7	46.64	5.54	4.51	0.08	3.65	7.78
100	CFM56-7B20	0.1	0.274	91.63	25.9	3.2	3.1	0.1	4.3	9.5

N°	Motore	Fuel Flow		Potenza	Emissioni					
		Kg/s		KN	g/Kg					
		7%	30%	max	CO		HC		NO _x	
				7%	30%	7%	30%	7%	30%	
101	CFM56-7B20/2	0.102	0.278	91.63	49.71	11.37	8.11	0.36	3.75	9.39
102	CFM56-7B20/3	0.094	0.268	91.6	43.31	5.03	3.84	0.08	3.77	7.98
103	CFM56-7B20E	0.094	0.268	91.6	43.31	5.03	3.84	0.08	3.8	8
104	CFM56-7B22	0.105	0.298	100.97	22.8	2.5	2.5	0.1	4.5	10
105	CFM56-7B22/2	0.105	0.303	100.97	45.35	30.87	7.26	6.06	3.94	6.37
106	CFM56-7B22/3	0.099	0.291	101	37.9	4.18	2.83	0.07	3.95	8.35
107	CFM56-7B22E	0.099	0.291	101	37.9	4.18	2.83	0.07	3.95	8.35
108	CFM56-7B22E/B1	0.099	0.291	101	37.9	4.18	2.83	0.07	3.95	8.35
109	CFM56-7B24	0.109	0.316	107.65	22	2.2	2.4	0.1	4.4	10.1
110	CFM56-7B24/2	0.109	0.313	107.65	42.72	30.32	6.55	6.01	4.08	6.72
111	CFM56-7B24/3	0.103	0.308	107.6	34.71	3.68	2.3	0.06	4.09	8.6
112	CFM56-7B24E	0.103	0.308	107.6	34.71	3.68	2.3	0.06	4.09	8.6
113	CFM56-7B24E/B1	0.103	0.308	107.6	34.71	3.68	2.3	0.06	4.09	8.6
114	CFM56-7B26	0.113	0.338	116.99	18.8	1.6	1.9	0.1	4.7	10.8
115	CFM56-7B26	0.113	0.338	116.99	18.8	1.6	1.9	0.1	4.7	10.8
116	CFM56-7B26/2	0.113	0.334	116.99	39.93	26.07	5.88	4.73	4.27	7.26
117	CFM56-7B26/3	0.108	0.331	117	30.94	3.07	1.75	0.05	4.27	8.93
118	CFM56-7B26E	0.108	0.331	117	30.94	3.07	1.75	0.05	4.27	8.93
119	CFM56-7B26E/B1	0.108	0.331	117	30.94	3.07	1.75	0.05	4.27	8.93
120	CFM56-7B26E/B2	0.108	0.331	117	30.94	3.07	1.75	0.05	4.27	8.93
121	CFM56-7B26E/B2F	0.108	0.331	117	30.94	3.07	1.75	0.05	4.27	8.93
122	CFM56-7B26E/F	0.108	0.331	117	30.94	3.07	1.75	0.05	4.27	8.93
123	CFM56-7B27	0.116	0.349	121.44	17.9	1.4	1.7	0.1	4.8	11
124	CFM56-7B27/2	0.115	0.351	121.44	38.73	24.28	5.56	4.21	4.36	7.53
125	CFM56-7B27/3	0.11	0.343	121.4	29.39	2.82	1.54	0.05	4.36	9.09
126	CFM56-7B27AE	0.11	0.343	121.4	29.39	2.82	1.54	0.05	4.36	9.09
127	CFM56-7B27E	0.11	0.343	121.4	29.39	2.82	1.54	0.05	4.36	9.09
128	CFM56-7B27E/B1	0.11	0.343	121.4	29.39	2.82	1.54	0.05	4.36	9.09
129	CFM56-7B27E/B1F	0.11	0.343	121.4	29.39	2.82	1.54	0.05	4.36	9.09
130	CFM56-7B27E/B3	0.11	0.343	121.4	29.39	2.82	1.54	0.05	4.36	9.09

N°	Motore	Emissioni								
		Fuel Flow		Potenza	g/Kg					
		Kg/s		KN	CO		HC		NOx	
7%	30%	max	7%	30%	7%	30%	7%	30%		
530	TAY 611-8C	0.105	0.241	61.61	28.55	4.99	1.11	0	2.76	5.6
531	TAY 611-8C	0.102	0.215	61.6	24.4	2.89	1.49	0.65	2.53	5.31
532	TAY 650	0.12	0.25	67.2	22.36	1.76	1.23	0.11	2.5	5.26
533	TAY 651	0.12	0.26	68.5	23.26	1.64	1.32	0.12	2.52	5.42
534	TAY 651	0.12	0.26	68.5	32.68	6.11	3.1	0.85	1.72	4.77
535	TAY Mk611-8	0.11	0.23	61.6	24.1	3.9	3.4	0.9	2.5	5.7
536	TAY Mk620-15	0.11	0.23	61.6	24.1	3.9	3.4	0.9	2.5	5.7
537	TAY Mk650-15	0.119	0.254	67.2	33.77	6.54	3.29	0.88	1.7	4.55
538	Trent 553-61	0.23	0.6	251.9	10.5	0.66	0.14	0.04	5.96	11.37
539	Trent 556-61	0.23	0.62	261.5	10.3	0.46	0.1	0	6.19	11.78
540	Trent 556-61	0.23	0.62	263.9	9.96	0.54	0.13	0.04	6.09	11.68
541	Trent 768	0.26	0.8	298.7	10.52	0.86	1.08	0.84	5.6	10.34
542	Trent 768	0.27	0.81	300.3	20.22	1.02	1.89	0.01	4.52	10.01
543	Trent 772	0.27	0.84	315.9	9.36	0.78	0.97	0.81	5.74	10.68
544	Trent 772	0.28	0.85	316.3	17.94	0.89	1.46	0.01	4.71	10.3
545	Trent 768	0.259	0.781	304.2	26.94	1.71	3.19	0.04	4.46	10.12
546	Trent 772	0.27	0.821	320.3	23.97	1.56	2.46	0.04	4.66	10.42
547	Trent 875	0.28	0.88	351.85	19.66	0.86	1.78	0	4.64	10.43
548	Trent 877	0.28	0.9	361.64	18.42	0.8	1.55	0	4.75	10.59
549	Trent 884	0.31	0.97	390.1	15.19	0.65	1	0	5.04	11.07
550	Trent 892	0.3	1.05	411.48	13.07	0.57	0.7	0	5.33	11.58
551	Trent 895	0.33	0.7	413.05	14.71	0.54	0.89	0	5.11	11.39
552	Trent 970-84	0.3	0.75	334.7	15.1	1.4	0.2	0	5.1	11.4
553	Trent 972-84	0.27	0.625	345.9	15.94	1.4	0.24	0	5	11.8
554	Trent 1000-A	0.237	0.668	310.8	8.73	0.77	0.06	0	5.4	13.29
555	Trent 1000-C	0.246	0.668	334.7	7.66	0.68	0.04	0	5.66	13.86
556	Trent 1000-D	0.246	0.57	334.7	7.66	0.68	0.04	0	5.66	13.86
557	Trent 1000-E	0.222	0.649	279.8	10.63	0.92	0.09	0	5.06	12.54
558	Trent 1000-G	0.242	0.583	323.7	8.14	0.72	0.05	0	5.54	13.6
559	Trent 1000-H	0.226	0.625	286.7	10.11	0.88	0.08	0	5.14	12.72
560	Trent 1000-A	0.237	0.668	310.9	8.45	0.75	0.05	0	5.47	13.2
561	Trent 1000-C	0.247	0.668	334.7	7.41	0.65	0.03	0	5.72	13.77
562	Trent 1000-D	0.247	0.549	334.7	7.41	0.65	0.03	0	5.72	13.77
563	Trent 1000-E	0.217	0.649	268	11.2	0.99	0.1	0	5	12.16
564	Trent 1000-G	0.242	0.583	323.7	7.88	0.69	0.04	0	5.6	13.5
565	Trent 1000-H	0.226	0.624	287.1	9.8	0.87	0.07	0	5.21	12.62
566	Trent 1000-A2	0.245	0.666	310.9	8.4	0.77	0.04	0	5.48	13.11
567	Trent 1000-C2	0.247	0.666	334.7	7.37	0.67	0.03	0	5.74	13.67
568	Trent 1000-D2	0.247	0.549	334.7	7.37	0.67	0.03	0	5.74	13.67
569	Trent 1000-E2	0.223	0.647	268	11.35	1.01	0.1	0	4.98	12.12

N°	Motore	Fuel Flow		Potenza	Emissioni					
		Kg/s		KN	g/Kg					
		7%	30%	max	CO		HC		NOx	
				7%	30%	7%	30%	7%	30%	
570	Trent 1000-G2	0.243	0.582	323.7	7.81	0.72	0.04	0	5.62	13.41
571	Trent 1000-H2	0.233	0.696	287.1	9.82	0.89	0.07	0	5.21	12.56
572	Trent 1000-J2	0.254	0.696	350.9	6.8	0.62	0.02	0	5.91	14.06
573	Trent 1000-K2	0.254	0.666	350.9	6.8	0.62	0.02	0	5.91	14.06
574	Trent 1000-L2	0.247	0.623	334.7	7.37	0.67	0.03	0	5.74	13.67
575	Trent 1000-AE3	0.239	0.667	310.9	6.93	0.76	0	0	5.9	13.5
576	Trent 1000-CE3	0.249	0.667	334.7	6.23	0.65	0	0	6.16	14.08
577	Trent 1000-D3	0.249	0.647	334.7	6.23	0.65	0	0	6.16	14.08
578	Trent 1000-G3	0.245	0.579	323.7	6.54	0.7	0	0	6.04	13.81
579	Trent 1000-H3	0.229	0.699	287.1	7.78	0.89	0	0	5.64	12.94
580	Trent 1000-J3	0.256	0.699	350.9	5.8	0.58	0	0	6.34	14.49
581	Trent 1000-K3	0.256	0.667	350.9	5.8	0.58	0	0	6.34	14.49
582	Trent 1000-L3	0.249	0.712	334.7	6.23	0.65	0	0	6.16	14.08
583	Trent 1000-M3	0.26	0.712	358.1	6.13	0.59	0	0	6.61	14.72
584	Trent 1000-N3	0.26	0.667	358.1	6.13	0.59	0	0	6.61	14.72
585	Trent 1000-P3	0.249	0.699	334.7	6.23	0.65	0	0	6.16	14.08
586	Trent 1000-Q3	0.256	0.723	350.9	5.8	0.58	0	0	6.34	14.49
587	Trent 1000-R3	0.262	0.67	363.9	5.99	0.57	0	0	6.67	14.87
588	Trent 7000-72	0.241	0.67	327.9	6.45	0.63	0	0	6.1	14.12
589	Trent 7000-72C	0.241	0.715	327.9	6.45	0.63	0	0	6.1	14.12
590	Trent XWB-75	0.27	0.755	334	24.36	1.54	1.3	0	4.38	10.51
591	Trent XWB-79	0.28	0.755	355.2	22.51	1.36	1.11	0	4.55	10.95
592	Trent XWB-79B	0.28	0.801	355.2	22.51	1.36	1.11	0	4.55	10.95
593	Trent XWB-84	0.291	0.715	379	20.66	1.2	0.94	0	4.73	11.46
594	Trent XWB-75	0.27	0.755	334	25.26	1.56	1.42	0.01	4.06	10.13
595	Trent XWB-79B	0.28	0.755	355.2	23.37	1.36	1.22	0.01	4.23	10.59
596	Trent XWB-79	0.28	0.801	355.2	23.37	1.36	1.22	0.01	4.23	10.59
597	Trent XWB-84	0.291	0.907	379	21.46	1.18	1.03	0.01	4.41	11.12
598	Trent XWB-97	0.325	0.72	436.7	19.09	0.53	0.89	0	4.81	12.69
599	Trent 970-84	0.255	0.749	338.7	13.38	1.16	0.04	0.08	5.44	12.09
600	Trent 970B-84	0.261	0.735	352.9	12.65	1.05	0.04	0.07	5.57	12.37
601	Trent 972-84	0.258	0.735	345.9	13	1.1	0.04	0.07	5.51	12.23
602	Trent 972E-84	0.258	0.1172	345.9	13	1.1	0.04	0.07	5.51	12.23
603	ALF 502L-2	0.0477	0.1027	33.4	45.63	3.97	6.65	0.183	3.38	6.47
604	ALF 502R-3	0.0432	0.1034	29.8	44.67	8.43	6.51	0.287	3.3	6.15
605	ALF 502R-5	0.0408	0.1083	31	40.93	7.1	5.39	0.217	3.78	6.6
606	LF507-1F, -1H	0.0453	0.211	31	37.83	4.43	4.72	0.12	3.28	6.39
607	D-36 ser. 4A	0.092	0.211	63.77	20.7	2.7	5.4	0	5.5	9
608	D-436-148 F1	0.093	0.218	64.43	23.46	2.99	2.26	0.07	3.64	7.26
609	D-436-148 F2	0.099	0.225	68.72	19.56	2.71	1.39	0.08	3.78	7.31

Appendice E

Codice Matlab

La Figura E.1 presente alla pagina successiva introduce al ruolo delle diverse funzioni nel calcolo dei diagrammi ottimizzati finali.

Nella prima sezione è riportata la struttura del programma stesso, comprendente dell'interfaccia dove inserire il tipo di percorso scelto e il tipo di ottimizzazione da perseguire.

Ognuna delle funzioni ha un Output grafico specifico, che stato riportato nei differenti capitoli della trattazione.

Il programma può essere diviso in 4 parti:

1. INPUT di sistema, dove vengono inseriti i dati fondamentali (densità dell'aria, coefficienti d'attrito etc.) e i diversi input geometrici relativi al percorso considerato,
2. Elaborazione dei dati dei Motori, dove vengono costruiti i parametri di emissione e consumi del motore montato sull'aeromobile considerato,
3. Determinazione dei profili di velocità, che a sua volte si divide in due parti
 - (a) risolvendo le equazioni dell'equilibrio vengono trovati i valori di potenza del motore nelle diverse fasi di circolazione. Integrando i valori di potenza su una taxiway si calcolano le emissioni ed i consumi totali specifici per quel settore.
 - (b) assemblando i profili di velocità ottimi per ogni taxiway si ricostruisce il profilo di velocità per il percorso considerato
4. OUTPUT di sistema, dove i dati finali vengono organizzati e stampati in funzione delle preferenze inserite nella fase iniziale.

Per brevità della trattazione, non vengono riportate le linee di codice contenenti i dati di input geometrici e il database dei motori (già riportato parzialmente all'Appendice D).

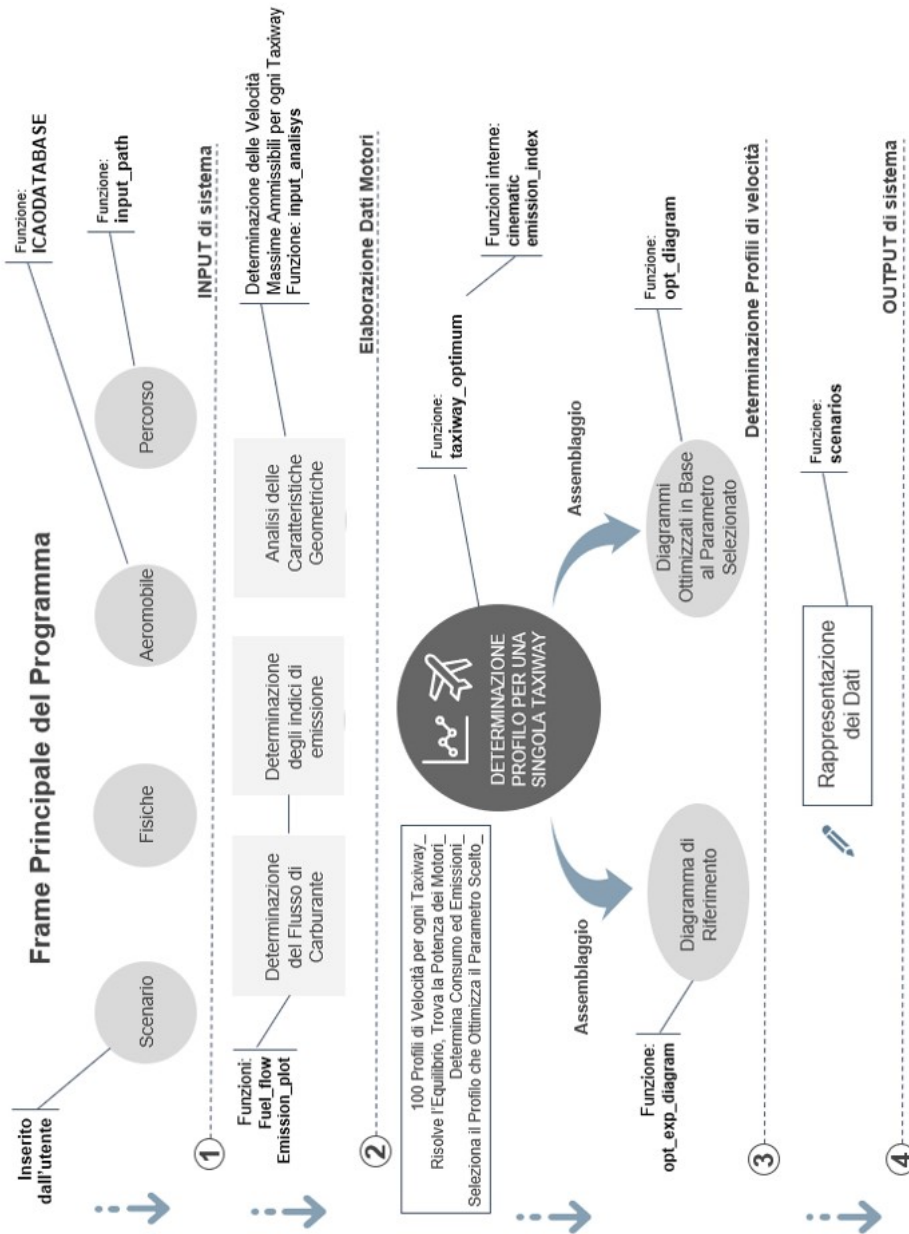


Figura E.1: Frame Principale del Programma

E.1 Frame Principale del Programma

```

1  %TOTAL EMISSION AND CONSUPTION FOR A TAXIWAY PATH%
2  clear
3  clc
4
5
6
7  %% SECTION A- UPLOAD DATA AND INITIALIZATION OF VARIABLES
8
9  %Saves the ICAO Engine Database
10 [database]=ICAOdatabase;
11
12 %Inputs of the system
13 Engine_index=552;      %number of the engine in the ICAO database
14 num_engines=4;        %number of engines
15 Mfow=510000;          %(kg)
16 diam_fus=7.14;        %diametre of fuselage (m)
17 rho=3.76;             %density of the air (kg/m^3)
18 slope=0.01;          %Slope of the taxiway (%)
19 Cd=0.024;            %Drag Coefficient
20 g=9.81;              %(m/s^2)
21 a1=0.9;              %comfort acceleration (m/s^2)
22 a2=-0.6;            %comfort deceleration (m/s^2)
23 Speed_Limit=15;      %Speed limit on the path (m/s)
24 Exp_Speed=8;         %Theoretical speed of the airplanes
25
26 %Choose the path:
27 %1) From T1 to Runway 35R
28 %2) From T2 to Runway 35R
29 %3) From T2 to Runway 35L
30 path_choice=1;
31
32 [num_sect,v0,v1,v3,taxi_length,turn]=input_path(path_choice);
33
34 %What would you like to optimize? Put one number between 1 and 4.
35 %1 optimizes consumption
36 %2 Optimizes CO emissions
37 %3 Optimizes HC emissions
38 %4 Optimizes NOx emissions
39 preference=1;
40
41
42
43 %% SECTION B -AIRCRAFT INFORMATIONS- FUEL_FLOW and EMISSION PLOT
44
45 %calls the input analysis to find the values of maximum speed for
    each taxiway section
46 [v1]= input_analysis(turn,v1,a1,a2,v0,v3,taxi_length,num_sect);

```

```

47
48 %Computes the fuel flow plot for the aircraft
49 [m,q]= fuel_flow(Engine_index , database);
50
51 %Plots the graph of emission indexes
52 emission_plot(m,q,Engine_index ,database)
53
54
55
56 %% SECTION C –SPEED PROFILE– MINIMUM OF THE SELECTED PARAMETER
57
58 opt_diagram(Speed_Limit ,turn , preference , num_sect ,Engine_index ,
             num_engines ,v0 ,v3 ,taxi_lenght ,MIOW,diam_fus ,ro , slope ,Cd, g,
             a1 ,a2 ,v1 , database ,m,q);
59
60 %if we're analysing the fuel consumption, it also plots the fuel
61 %consumption function for the first straight stretch
62
63
64
65 %% SECTION E –SPEED PROFILE– EXPERIMENTAL PROFILE
66
67 opt_time_diagram(Exp_Speed , num_sect , Engine_index , num_engines , v0 ,
                 v3 , taxi_lenght , MIOW, diam_fus , ro , slope , Cd, g, a1 , a2 , v1 ,
                 database , m, q);
68
69
70
71 %% SECTION F –OUTCOME OF THE SCENARIOS
72
73 %displays the values of emission/consumption of the optimized
   parameter
74 scenarios (preference , num_sect , Engine_index , num_engines , v0 , v3 ,
            taxi_lenght , MIOW, diam_fus , ro , slope , Cd, g, a1 , a2 , v1 , database ,
            m, q , Exp_Speed , Speed_Limit);

```

E.2 Fuel flow

```
1 %FUEL FLOW PLOT%
2
3
4 function [m,q]= fuel_flow(Engine_index , database)
5
6 %Initializes the values
7 m=zeros(size(database ,1) ,1);
8 q=zeros(size(database ,1) ,1);
9
10 %Finds m and q for all the engines in the database
11 for i=1:size(database ,1)
12     m(i)=(database(i ,2)-database(i ,1))/23;
13     q(i)=database(i ,1)-m(i)*7;
14 end
15
16 %Selects the values of m and q of the considered aircraft
17 m=m(Engine_index);
18 q=q(Engine_index);
19
20 %Plots the fuel flow plot for the considered aircraft
21 Thrust=linspace(0,40);
22 Engine_ff=m*Thrust+q;
23
24 figure(1);
25 plot(Thrust , Engine_ff , 'k' , 'Linewidth' ,1);
26 title('Engine Fuel Flow' , 'FontSize' ,12);
27 xlabel('Thrust (%)' , 'FontSize' ,10);
28 ylabel('Fuel Flow (kg/s)' , 'FontSize' ,10);
29 grid on;
```

E.3 Emission plot

```

1 %EMISSION PLOT FOR THE CONSIDERED ENGINE%
2
3
4 function emission_plot(m_ff,q_ff,Engine_index,database)
5
6 %Generates the values of emission indexes with different Thrust
   levels
7 Thrust=linspace(3,40)';
8 [emiss_indexNOx,emiss_indexCO,emiss_indexHC]= emiss_index(m_ff,
   q_ff,Thrust,Engine_index,database);
9
10 %Plots in a single graph all the emission indexes, varying the
   thrust
11 %settings
12 figure(2)
13 plot(Thrust,emiss_indexNOx,'k',Thrust,emiss_indexCO,'y',Thrust,
   emiss_indexHC,'r','Linewidth',1)
14 set(gca,'FontSize',12)
15 title('Emission indexes','FontSize',14)
16 xlabel('Thrust (%)','FontSize',12)
17 ylabel('EI (g/kg)','FontSize',12)
18 legend('EI NOx','EI CO','EI HC','Location','NorthEastOutside')
19 axis([0 40 0 50]);
20 grid on
21 grid minor

```

E.4 Input analysis

```

1  %INPUT ANALYSIS%
2
3  function [v1]= input_analysis(turn,v1,a1,a2,v0,v3,taxi_lenght ,
4      num_sect)
5  %For each segment of the taxiway path generates 101 compatible
6  speed
7  %profiles. The maximum speed is calculated with cinematics
8  considerations.
9  %If the segment is a turn, the speed is set to be 5.14 m/s^2
10     for i=1:num_sect
11         vmax(i)=sqrt((2*a1*a2*taxi_lenght(i)+a2*v0(i)^2-a1*v3(i)^2)/(
12             a2-a1));
13         if turn(i)=='y'
14             v1(i,:)=5.14;
15         else
16             v1(i,:)=linspace(v0(i),vmax(i)-0.05,101);    %m/s Cruising
17             Speed values
18         end
19     end
20
21 %Check on the inputs. If the inputs are wrong, an error message
22 is
23 %displayed
24
25 if a2>0
26     disp('ERROR, the value of a2 should be negative')
27 end
28 if a1<0
29     disp('ERROR, the value of a1 should be positive')
30 end

```

E.5 Taxiway optimum

```

1 %OPTIMUM SPEEDS FOR A TAXIWAY OF GIVEN LENGHT%
2
3 function [opt_v1cons, opt_v1CO, opt_v1HC, opt_v1NOx, opt_v1time,
    opt_time, total_consumption, total_CO, total_HC, total_NOx]=
    taxiway_optimum(Engine_index, num_engines, v0, v3, taxi_lenght,
    M1OW, diam_fus, ro, slope, Cd, g, a1, a2, v1, database, m_ff, q_ff,
    Speed_Limit)
4
5
6 %% SECTION A –CREATION and PLOT OF SPEED PROFILES–
7
8 %Generates all the possible speed profiles within the given
    taxiway and plots it
9 [a1, ~, v1, ~, ~, ~, ~, t]= cinematic (v0, v3, taxi_lenght, a1, v1, a2);
10
11
12 %% SECTION B –PERCENTAGE OF THRUST AND EMISSION INDEXES FOR THE 3
    PHASES OF THE TAXI
13
14 %computes the percentage of thrust in the different phases of the
    motion
15 Thrust1=ones(size(v1,2),1);
16 Thrust2=ones(size(v1,2),1);
17 Thrust3=ones(size(v1,2),1);
18
19 %Inputs for the computation of Thrust levels
20 vrif=41; %reference value for the computation of
    friction resistance
21 mu0=0.01; %friction coefficient between wheels and
    ground
22 A_rif=pi*diam_fus^2/4; %Frontal Area to be used for the air
    resistance computation (m^2)
23
24 %Computes the thrust level for each generated speed profiles
25 %Uses the equilibrium equations
26 for i=1:101
27 Thrust1(i)=max(7, (M1OW*a1+M1OW*9.81*mu0*(1+(v0+v1(i)/2)/vrif)
    +0.5*Cd*ro*(v0+v1(i)/2)^2*A_rif+M1OW*g*slope)/(database(
    Engine_index,3)*1000*num_engines)*100); %kN
28 Thrust2(i)=(max(7, (M1OW*9.81*mu0*(1+v1(i)/vrif)+0.5*Cd*ro*v1(i)
    .^2*A_rif+M1OW*g*slope)/(database(Engine_index,3)*1000*
    num_engines)*100))';
29 Thrust3(i)=5;
30 end
31
32 Thrust=[Thrust1, Thrust2, Thrust3];
33

```

```

34 %Computes the emission index and the fuel flow for the aircraft
    for each generated speed profile
35 [emiss_indexNOx,emiss_indexCO,emiss_indexHC,fuel_flow]=
    emiss_index(m_ff,q_ff,Thrust,Engine_index,database);
36
37
38
39 %% SECTION C –TOTAL EMISSION OF THE CONSIDERED AIRPLANE FOR THE
    CONSIDERED TAXIWAY
40
41 %computes the total emission for the taxiroute
42 CO_emiss=t'.*fuel_flow'.*emiss_indexCO*num_engines;
43 HC_emiss=t'.*fuel_flow'.*emiss_indexHC*num_engines;
44 NOx_emiss=t'.*fuel_flow'.*emiss_indexNOx*num_engines;
45
46 %Sums up the contribution of the 3 phases (i.e. acceleration,
    costant cruise and deceleration)
47 total_CO=CO_emiss*ones(3,1);
48 total_HC=HC_emiss*ones(3,1);
49 total_NOx=NOx_emiss*ones(3,1);
50 total_consumption=(t.*fuel_flow)'.*ones(3,1)*num_engines;
51 t_tot=[t(1,:)+t(2,:)+t(3,:)];
52
53 %Eventually plots the final diagrams for the taxiway
54 %total_plot(total_CO,total_HC,total_NOx,total_consumption,t_tot,
    v1)
55
56 %Finds the optimum values
57 [~,v1_opt_ind_cons]=min(total_consumption);
58 opt_v1cons=v1(v1_opt_ind_cons);
59
60 [~,v1_opt_ind_CO]=min(total_CO);
61 opt_v1CO=v1(v1_opt_ind_CO);
62
63 [~,v1_opt_ind_HC]=min(total_HC);
64 opt_v1HC=v1(v1_opt_ind_HC);
65
66 [~,v1_opt_ind_NOx]=min(total_NOx);
67 opt_v1NOx=v1(v1_opt_ind_NOx);
68
69 opt_v1time=min(max(v1),Speed_Limit);
70 opt_time=min(t_tot);

```

E.5.1 Cinematic

```

1 %SPEED PROFILE FOR THE CONSIDERED TAXIWAY%
2
3 function [a1,a2,v1,v2,d1,d2,d3,t]= cinematic (v0,v3,taxi_lenght ,
      a1,v1,a2)
4
5 %Initialization of variables
6 t2=ones(1,size(v1,2));
7 d1=ones(1,size(v1,2));
8 v2=ones(1,size(v1,2));
9 d2=ones(1,size(v1,2));
10 d3=ones(1,size(v1,2));
11 t1=ones(1,size(v1,2));
12 t3=ones(1,size(v1,2));
13
14 %Cinematic considerations to create the speed profiles
15 for i=1:size(v1,2)
16 d1(1,i)=(v1(1,i)^2-v0^2)/(2*a1);
17 v2(1,i)=v1(1,i);
18 t1(1,i)=(v1(1,i)-v0)/a1;
19 d3(1,i)=(v3^2-v2(1,i)^2)/(2*a2);
20 d2(1,i)=taxi_lenght-d1(1,i)-d3(1,i);
21 t2(1,i)=d2(1,i)/v2(1,i);
22 t3(1,i)=(v3-v2(1,i))/a2;
23 %Checks if the speed profile is acceptable
24 if d2(1,i)<=0
25     disp('ERROR! The value of cruise speed is too high! the
      maximum value is')
26     disp(v1(1,i))
27     break
28 end
29 end
30
31 t=[t1;t2;t3];
32
33 %Eventually Plots 6 different speed diagrams inside the
      considered range
34 % for k = 1:20:101
35 %
36 %     A=[0,v0;t1(k),v1(k);t2(k)+t1(k),v2(k);t3(k)+t2(k)+t1(k),v3
      ];
37 %     x=A(:,1);
38 %     y=A(:,2);
39 %
40 %     figure(3)
41 %     hold on
42 %     plot(x,y,'Linewidth',2)
43 %     title('Speed Profiles','FontSize',16);

```



```
44 %     xlabel('Time (s)', 'FontSize', 12);
45 %     ylabel('Velocity (m/s)', 'FontSize', 12);
46 %     grid on;
47 % end
```

E.5.2 Emission index

```

1  %COMPUTATION OF EMISSION INDEXES%
2
3  %Generates the emission indexes linearly interpolating the
   values of ICAO
4  %database
5  function [emiss_indexNOx,emiss_indexCO,emiss_indexHC,fuel_flow]=
   emiss_index(m,q,Thrust,Engine_index,database)
6
7  %NOx emissions for 7% and 30% Thrust
8  A=database(:,4:5);
9  %CO emissions for 7% and 30% Thrust
10 B=database(:,6:7);
11 %HC emissions for 7% and 30% Thrust
12 C=database(:,8:9);
13
14 %Computes the fuel flow
15 fuel_flow=(m*Thrust+q)';
16
17 %Initializes the emission indexes
18 emiss_indexNOx= zeros (size(Thrust,1),1);
19 emiss_indexCO= zeros (size(Thrust,1),1);
20 emiss_indexHC= zeros (size(Thrust,1),1);
21
22 %Fills the emission indexes matrix with the computed values with
   different
23 %thrust settings. Sets the minimum value of the emission index at
   0.
24 for j=1:(size(Thrust,1))
25     for i=1:(size(Thrust,2))
26         emiss_indexNOx(j,i)=A(Engine_index,1)+(A(Engine_index,2)-A(
           Engine_index,1))/23*(Thrust(j,i)-7);
27         emiss_indexCO(j,i)=B(Engine_index,1)+(B(Engine_index,2)-B(
           Engine_index,1))/23*(Thrust(j,i)-7);
28         emiss_indexHC(j,i)=C(Engine_index,1)+(C(Engine_index,2)-C(
           Engine_index,1))/23*(Thrust(j,i)-7);
29         if emiss_indexNOx(j,i)<0
30             emiss_indexNOx(j,i)=0;
31         else if emiss_indexCO(j,i)<0
32             emiss_indexCO(j,i)=0;
33         else if emiss_indexHC(j,i)<0
34             emiss_indexHC(j,i)=0;
35             end
36         end
37     end
38 end
39 end

```

E.6 Opt diagram

```

1  %SPEED PROFILE FOR PARAMETER OPTIMIZATION%
2
3  function opt_diagram(Speed_Limit,turn,preference,num_sect,
      Engine_index,num_engines,v0,v3,taxi_lenght,MFOW,diam_fus,ro,
      slope,Cd,g,a1,a2,v1,database,m,q);
4
5  %Initializes the time
6  t(1)=0;
7
8  %Calls the taxiway_optimum function that finds the optimum
9  %values of speed for fuel consumption, taxiing time, CO, HC and
      NOx
10 %emissions for a single section
11 for i=1:num_sect
12
13 [A,B,C,D,E,F,total_consumption,total_CO,total_HC,total_NOx]=
      taxiway_optimum(Engine_index,num_engines,v0(i),v3(i),
      taxi_lenght(i),MFOW,diam_fus,ro,slope,Cd,g,a1,a2,v1(i,:),
      database,m,q,Speed_Limit);
14 opt_v1cons(i)=min(Speed_Limit,A);
15 opt_v1CO(i)=min(Speed_Limit,B);
16 opt_v1HC(i)=min(Speed_Limit,C);
17 opt_v1NOx(i)=min(Speed_Limit,D);
18 opt_v1time(i)=min(Speed_Limit,E);
19 opt_taxitime(i)=min(Speed_Limit,F);
20 plot_consum(:,i)=total_consumption;
21 plot_CO(:,i)=total_CO;
22 plot_HC(:,i)=total_HC;
23 plot_NOx(:,i)=total_NOx;
24
25 if preference==1
26     f(i)=opt_v1cons(i);
27 else if preference==2
28     f(i)=opt_v1CO(i);
29     else if preference==3
30     f(i)=opt_v1HC(i);
31     else if preference==4
32     f(i)=opt_v1NOx(i);
33     end
34     end
35     end
36 end
37
38
39 %Organizes the data to create the fuel consumption optimized
      speed profile for each segment
40 d1(i)=(f(i)^2-v0(i)^2)/(2*a1);

```

```

41 v2(i)=f(i);
42 t1(i)=(f(i)-v0(i))/a1;
43 d3(i)=(v3(i)^2-v2(i)^2)/(2*a2);
44 d2(i)=taxi_lenght(i)-d1(i)-d3(i);
45 t2(i)=d2(i)/v2(i);
46 t3(i)=(v3(i)-v2(i))/a2;
47 t(i+1)=t1(i)+t2(i)+t3(i)+t(i);
48 end
49
50 %Puts the optimized speed profiles for each taxiway one after the
    other
51 for k=1:num_sect
52 P=[t(k),v0(k);t1(k)+t(k), f(k);t2(k)+t1(k)+t(k),v2(k);t3(k)+t2(k)
    +t1(k)+t(k),v3(k)];
53 x=P(:,1);
54 y=P(:,2);
55
56 figure(3)
57 hold on
58 plot(x,y,'r','Linewidth',1)
59 title('Speed Profiles','FontSize',16);
60 xlabel('Time (s)','FontSize',14);
61 ylabel('Velocity (m/s)','FontSize',14);
62 grid on
63 grid minor
64 end
65 grid on
66 grid minor
67
68 if preference ==1
69 if turn(1)=='n'
70
71 figure(4)
72 plot(v1(1,:),plot_consum(:,1),'b','Linewidth',1)
73 set(gca,'FontSize',12)
74 title('Total consumption for the first straight section','
    FontSize',16)
75 xlabel('Cruising Speed (m/s)','FontSize',14)
76 ylabel('Total Consumption (kg)','FontSize',14)
77 grid on
78 grid minor
79
80 %else
81
82 figure(14)
83 plot(v1(2,:),plot_consum(:,2),'b','Linewidth',1)
84 set(gca,'FontSize',18)
85 title('Total consumption for the first straight section','
    FontSize',16)

```

```

86 xlabel('Cruising Speed (m/s)', 'FontSize', 14)
87 ylabel('Total Consumption (kg)', 'FontSize', 14)
88 grid on
89 grid minor
90 end
91 else
92     if turn(1)=='n'
93         figure(4)
94         plot(v1(1,:), plot_CO(:,1), 'y', v1(1,:), plot_HC(:,1), 'r', v1(1,:),
95             plot_NOx(:,1), 'k', 'Linewidth', 1)
96         title('Total emission for the first straight section', 'FontSize',
97             ,12)
98         set(gca, 'FontSize', 12)
99         xlabel('Cruising Speed (m/s)', 'FontSize', 10)
100        ylabel('Total Emission (g)', 'FontSize', 10)
101        legend('emission CO', 'emission HC', 'emission NOx', 'Location', '
102            NorthEastOutside')
103        grid on
104        grid minor
105        else
106            figure(4)
107            plot(v1(2,:), plot_CO(:,2), 'y', v1(2,:), plot_HC(:,2), 'r', v1(2,:),
108                plot_NOx(:,2), 'k', 'Linewidth', 1)
109            title('Total emission for the first straight section', 'FontSize',
110                ,12)
111            set(gca, 'FontSize', 12)
112            xlabel('Cruising Speed (m/s)', 'FontSize', 10)
113            ylabel('Total Emission (g)', 'FontSize', 10)
114            legend('emission CO', 'emission HC', 'emission NOx', 'Location', '
115                NorthEastOutside')
116        grid on
117        grid minor
118        end
119    end
120 end

```

E.7 Opt exp diagram

```

1 %SPEED PROFILE FOR EXPERIMENTAL SCENARIO%
2
3 function opt_exp_diagram(Exp_Speed,num_sect,Engine_index,
    num_engines,v0,v3,taxi_lenght,MiOW,diam_fus,ro,slope,Cd,g,
    a1,a2,v1,database,m,q);
4
5 %Initializes the time
6 t(1)=0;
7
8 %Calls the taxiway_optimum function that finds the optimum
9 %values of speed for fuel consumption, taxiing time, CO, HC and
    NOx
10 %emissions for a single section
11 for i=1:num_sect
12
13 [~,~,~,~,E,~]=taxiway_optimum(Engine_index,num_engines,v0(i),v3(
    i),taxi_lenght(i),MiOW,diam_fus,ro,slope,Cd,g,a1,a2,v1(
    i,:),database,m,q,Exp_Speed);
14 opt_v1time(i)=E;
15
16 %Organizes the data to create the taxi time optimized speed
    profile for each segment
17 d1(i)=(opt_v1time(i)^2-v0(i)^2)/(2*a1);
18 v2(i)=opt_v1time(i);
19 t1(i)=(opt_v1time(i)-v0(i))/a1;
20 d3(i)=(v3(i)^2-v2(i)^2)/(2*a2);
21 d2(i)=taxi_lenght(i)-d1(i)-d3(i);
22 t2(i)=d2(i)/v2(i);
23 t3(i)=(v3(i)-v2(i))/a2;
24 t(i+1)=t1(i)+t2(i)+t3(i)+t(i);
25 end
26
27 %Puts the optimized speed profiles for each taxiway one after the
    other
28 for k=1:num_sect
29 A=[t(k),v0(k);t1(k)+t(k),opt_v1time(k);t2(k)+t1(k)+t(k),v2(k);t3(
    k)+t2(k)+t1(k)+t(k),v3(k)];
30 x=A(:,1);
31 y=A(:,2);
32
33 figure(3)
34 hold on
35 plot(x,y,'k','Linewidth',1)
36 title('Speed Profiles','FontSize',16);
37 xlabel('Time (s)','FontSize',14);
38 ylabel('Velocity (m/s)','FontSize',14);
39 grid on

```

```
40     grid minor  
41 end
```

E.8 Scenarios

```

1  %VISUALIZATION OF ANALYSIS RESULTS%
2
3  function scenarios (preference , num_sect , Engine_index , num_engines ,
4     v0 , v3 , taxi_length , MTOW , diam_fus , ro , slope , Cd , g , a1 , a2 , v1 ,
5     database , m , q , Exp_Speed , Speed_Limit ) ;
6
7
8  for i = 1 : num_sect
9
10 [ ~ , ~ , ~ , ~ , ~ , ~ , total_consumption , total_CO , total_HC , total_NOx ] =
11     taxiway_optimum ( Engine_index , num_engines , v0 ( i ) , v3 ( i ) ,
12     taxi_length ( i ) , MTOW , diam_fus , ro , slope , Cd , g , a1 , a2 , v1 ( i , : ) ,
13     database , m , q , Exp_Speed ) ;
14
15 [ ~ , b ] = min ( total_consumption ) ;
16 [ ~ , c ] = min ( abs ( v1 ( i , : ) - Speed_Limit ) ) ; %To limit the maximum speed
17 x1 ( 1 , i ) = total_consumption ( min ( b , c ) , 1 ) ;
18 x1 ( 2 , i ) = total_CO ( min ( b , c ) , 1 ) ;
19 x1 ( 3 , i ) = total_HC ( min ( b , c ) , 1 ) ;
20 x1 ( 4 , i ) = total_NOx ( min ( b , c ) , 1 ) ;
21
22 [ ~ , b ] = min ( total_CO ) ;
23 x2 ( 1 , i ) = total_consumption ( min ( b , c ) , 1 ) ;
24 x2 ( 2 , i ) = total_CO ( min ( b , c ) , 1 ) ;
25 x2 ( 3 , i ) = total_HC ( min ( b , c ) , 1 ) ;
26 x2 ( 4 , i ) = total_NOx ( min ( b , c ) , 1 ) ;
27
28 [ ~ , b ] = min ( total_HC ) ;
29 x3 ( 1 , i ) = total_consumption ( min ( b , c ) , 1 ) ;
30 x3 ( 2 , i ) = total_CO ( min ( b , c ) , 1 ) ;
31 x3 ( 3 , i ) = total_HC ( min ( b , c ) , 1 ) ;
32 x3 ( 4 , i ) = total_NOx ( min ( b , c ) , 1 ) ;
33
34 [ ~ , b ] = min ( total_NOx ) ;
35 x4 ( 1 , i ) = total_consumption ( min ( b , c ) , 1 ) ;
36 x4 ( 2 , i ) = total_CO ( min ( b , c ) , 1 ) ;
37 x4 ( 3 , i ) = total_HC ( min ( b , c ) , 1 ) ;
38 x4 ( 4 , i ) = total_NOx ( min ( b , c ) , 1 ) ;
39
40 [ ~ , b ] = min ( abs ( v1 ( i , : ) - Exp_Speed ) ) ;
41 x5 ( 1 , i ) = total_consumption ( b , 1 ) ;
42 x5 ( 2 , i ) = total_CO ( b , 1 ) ;
43 x5 ( 3 , i ) = total_HC ( b , 1 ) ;
44 x5 ( 4 , i ) = total_NOx ( b , 1 ) ;
45
46 end
47
48 if preference == 1

```



```

43     disp('The total consumption for the fuel-optimized scenario
44         is ')
45     disp(x1(1,:) * ones(num_sect,1));
46     disp('kilos, with a CO emission of')
47     disp(x1(2,:) * ones(num_sect,1));
48     disp('grams, and a HC emission of')
49     disp(x1(3,:) * ones(num_sect,1));
50     disp('grams, and a NOx emission of')
51     disp(x1(4,:) * ones(num_sect,1));
52     disp('grams')
53     disp('agains a total consumption of')
54     disp(x5(1,:) * ones(num_sect,1));
55     disp('kilos, with a CO emission of')
56     disp(x5(2,:) * ones(num_sect,1));
57     disp('grams, and a HC emission of')
58     disp(x5(3,:) * ones(num_sect,1));
59     disp('grams, and a NOx emission of')
60     disp(x5(4,:) * ones(num_sect,1));
61     disp('grams, in the experimental scenario')
62 else if preference==2
63     disp('The total CO emission for the CO emission-optimized
64         scenario is ')
65     disp(x2(2,:) * ones(num_sect,1));
66     disp('grams, and a HC emission of')
67     disp(x2(3,:) * ones(num_sect,1));
68     disp('grams, and a NOx emission of')
69     disp(x2(4,:) * ones(num_sect,1));
70     disp('grams, and a consumption of')
71     disp(x2(1,:) * ones(num_sect,1));
72     disp('kilos')
73     disp('agains a total consumption of')
74     disp(x5(1,:) * ones(num_sect,1));
75     disp('kilos, with a CO emission of')
76     disp(x5(2,:) * ones(num_sect,1));
77     disp('grams, and a HC emission of')
78     disp(x5(3,:) * ones(num_sect,1));
79     disp('grams, and a NOx emission of')
80     disp(x5(4,:) * ones(num_sect,1));
81     disp('grams, in the experimental scenario')
82 else if preference==3
83     disp('The total HC emission for the HC emission-
84         optimized scenario')
85     disp(x3(3,:) * ones(num_sect,1));
86     disp('grams, and a CO emission of')
87     disp(x3(2,:) * ones(num_sect,1));
88     disp('grams, and a NOx emission of')
89     disp(x3(4,:) * ones(num_sect,1));
90     disp('grams, and a consumption of')
91     disp(x3(1,:) * ones(num_sect,1));

```

```
89         disp('kilos')
90     disp('against a total consumption of')
91     disp(x5(1,:) * ones(num_sect,1));
92     disp('kilos, with a CO emission of')
93     disp(x5(2,:) * ones(num_sect,1));
94     disp('grams, and a HC emission of')
95     disp(x5(3,:) * ones(num_sect,1));
96     disp('grams, and a NOx emission of')
97     disp(x5(4,:) * ones(num_sect,1));
98     disp('grams, in the experimental scenario')
99     else if preference==4
100         disp('The total NOx emission for the NOx emission-
101             optimized scenario')
102         disp(x4(4,:) * ones(num_sect,1))
103         disp('grams, and a CO emission of')
104         disp(x4(2,:) * ones(num_sect,1))
105         disp('grams, and a HC emission of')
106         disp(x4(3,:) * ones(num_sect,1))
107         disp('grams, and a consumption of')
108         disp(x4(1,:) * ones(num_sect,1))
109         disp('kilos')
110         disp('and against a total consumption of')
111         disp(x5(1,:) * ones(num_sect,1));
112         disp('kilos, with a CO emission of')
113         disp(x5(2,:) * ones(num_sect,1));
114         disp('grams, and a HC emission of')
115         disp(x5(3,:) * ones(num_sect,1));
116         disp('grams, and a NOx emission of')
117         disp(x5(4,:) * ones(num_sect,1));
118         disp('grams, in the experimental scenario')
119         end
120     end
121 end
```

Bibliografia

- [1] Record Easyjet. 70 Milioni di passeggeri annuali in transito a Malpensa. *Il Giornale*, 2019.
- [2] Airport Technology. The Growing Role Of Automation In Air Traffic Control, 2018.
- [3] E. M. Argyle, R. J. Houghton, J. Atkin, G. De Maere, T. Moore, and H. P. Morvan. Human performance and strategies while solving an aircraft routing and sequencing problem: an experimental approach. *Cognition, Technology and Work*, 20:425–441, 2018.
- [4] J. A. D. Atkin and E. K. Burke. A more realistic approach for airport ground movement optimisation with stand holding. 2011.
- [5] D. L. Bakowski, B. L. Hooey, D. C. Foyle, C. A. Wolter, and L. W. S. Cheng. NextGen Surface Trajectory-Based Operations : Contingency-hold clearances. 2013.
- [6] L. Baughcum, G. Tritz, C. Henderson, and C. Pickett. *Scheduled Civil Aircraft Emission Inventories and Analysis for 1992 : Database Development and Analysis*. 1996.
- [7] J. Chen, M. Weiszer, P. Stewart, and M. Shabani. Toward a More Realistic , Cost-Effective , and Greener Ground Movement Through Active Routing. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17:1196–1209, 2016.
- [8] G. Clare and A. Richards. *Optimization of Taxiway Routing and Runway Scheduling*. PhD thesis, University of Bristol, UK, 2011.
- [9] A. Cook and G. Tanner. European airline delay cost reference values. Technical report, 2015.

- [10] Y. Dabachine, M. Biniz, B. Bouikhalene, and A. Balouki. Conflict distribution prediction and optimization of aircraft in ground movements. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 98:636–656, 2020.
- [11] ENAC. Dati di Traffico Aeroportuale. Technical report, 2018.
- [12] EUROCONTROL. *Implementation Roadmap for A-SMGCS*. 2010.
- [13] EUROCONTROL. Runway Incursion Incidents in Europe - Safety Functions Maps analysis. Technical report, 2015.
- [14] EUROCONTROL. *Airport CDM Implementation Manual*. 2017.
- [15] EUROCONTROL. Local Single Sky Implementation, Italy. Technical report, 2018.
- [16] EUROCONTROL. *Specification for A-SMGCS Services*. 2018.
- [17] EUROCONTROL. *Update Draft of Specification for A-SMGCS Services*. 2020.
- [18] European Commission. *Handbook on External Costs of Transport*. 2019.
- [19] European Commission. Introduction to Airport Capacity and Quality, 2020.
- [20] Federal Aviation Organization. *Airport Capacity and Delay*. 1983.
- [21] FlightGlobal. Airline Business, January 2019 Edition. pages 40–41.
- [22] ICAO. *Surface Movement Guidance and Control Systems (SMGCS) Manual*. 1986.
- [23] ICAO. *Advanced-Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS) Manual*. 2004.
- [24] ICAO. *Airport Air Quality Manual*. 2011.
- [25] ICAO. *Annex 14-Aerodromes*, volume I. 2018.
- [26] ICAO. Database Emissioni Motori Aerei, 2019.
- [27] Y. Jiang, Z. Liao, and H. Zhang. A Collaborative Optimization Model for Ground Taxi Based on Aircraft Priority. 2013.

- [28] Y. Jiang, H. Wang, W. G. Fan, L. L. Chen, and M. T. Cai. Spatio-temporal cooperative optimization model of surface aircraft taxiing. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 19:127–135, 2019.
- [29] H. Khadilkar. *Estimation of Aircraft Taxi-Out Fuel Burn using Flight Data Recorder Analysis*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [30] K. Klein. Traffic Control on Airport Movement Areas, State of the Development. *IFAC Proceedings*, 33:607–613, 2000.
- [31] E. Livini. Malpensa gestisce i voli di Linate. Enav lancia la torre di controllo remota. *La Repubblica*, 2016.
- [32] G. Marchionni, M. Ponti, R. Gatti, and G. Pirani. Evaluation of an Automatic Taxiway Guidance Lights System. 2013.
- [33] B. Mirkovic and V. Tasic. Airport Apron Roundabout – Operational Concept and Capacity Evaluation. In *Transportation Research: Emerging Technologies*, 2016.
- [34] H. C. Muir. Contemporary Issues in Human Factors and Aviation Safety. 2005.
- [35] A. Pedroni. Malpensa, spesi 30 milioni per il nuovo terminal. *Il Fatto Quotidiano*, 2015.
- [36] Planefinder News. Communication in the Air, 2020.
- [37] P. C. Roling and H. G. Visser. Optimal Airport Surface Traffic Planning Using Mixed-Integer Linear Programming. 2008.
- [38] J. Roudet, P.-e. Thurat, and N. Turcot. Airport ground-traffic surveillance systems data feed innovative comprehensive analysis. *Transportation Research Procedia*, 14:3741–3750, 2016.
- [39] W. Schlenker and W. R. Walker. Airports, air pollution, and contemporaneous health. *Review of Economic Studies*, 83:768–809, 2016.
- [40] SEA Airports. Mappatura acustica dell ’ infrastruttura aeroportuale. Technical report, 2012.
- [41] SEA Airports. Regolamento di Scalo, 2019.
- [42] SEA Airports. Capacità Malpensa Aeroporto, 2020.

- [43] SEA Airports. Dati tecnici delle piste. Technical report, 2020.
- [44] Skybrary. Human Machine Interface Configuration, 2017.
- [45] M. E. Stettler, S. Eastham, and S. R. Barrett. Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions. 2011.
- [46] Stoica, Dragos, S. Gonzalez-Rojo, and Félix Mora-CaStomino. Airport ground traffic scheduling and control. *IFAC Proceedings*, 36, 2003.
- [47] Y. Tang, D. He, and X. Zhu. Aircraft taxiing path planning based on multi-agent system. *Journal of Jiangsu University*, 40:559–565, 2019.
- [48] Y. Tang, M. Hu, and H. Wu. 3D simulation of A-SMGCS surface movement based on flightgear. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 6:192–200, 2012.
- [49] Teutsch and Postma-Kurlanc. Enhanced Virtual Block Control for Milan Malpensa Airport in Low Visibility. In *ICNS*, 2014.
- [50] J. Tomaszewska, M. Zieja, M. Woch, and P. Krzysiak. Statistical analysis of ground-related incidents at airports. *Journal of KONES*, 25:467–472, 2018.
- [51] M. Weiszer, J. Chen, and P. Stewart. A real-time Active Routing approach via a database for airport surface movement. *Transportation Research: Emerging Technologies*, 58:127–145, 2015.
- [52] C. Wey, B. Anderson, C. Hudgins, C. Wey, X. Li-Jones, E. Winstead, L. K. Thornhill, P. Lobo, D. Hagen, and P. Whitefield. Aircraft particle emissions experiment (APEX). Technical report, 2006.
- [53] T. Xin-min, W. Yu-ting, and H. A. N. Song-chen. Aircraft dynamic taxiway routes planning for A-SMGCS based on DEFS. 2010.
- [54] X. Yang, S. Cheng, J. Lang, R. Xu, and Z. Lv. Characterization of aircraft emissions and air quality impacts of an international airport. *Journal of Environmental Sciences*, 72:198–207, 2018.
- [55] N. A. Zafar, F. Alhumaidan, and S. A. Khan. Z specification of gate and apron control management at airport. 2014.
- [56] M. Zhang, Q. Huang, S. Liu, and H. Li. Multi-Objective Optimization of Aircraft Taxiing on the Airport Surface with Consideration to Taxiing Conflicts and the Airport Environment. pages 1–27, 2019.

- [57] X. Zhu, X. Tang, and S. Han. Aircraft intersection collision conflict detection and resolution under the control of A-SMGCS. In *International Conference on Modelling, Identification and Control*, 2012.

Ringraziamenti

Vorrei dedicare questo breve spazio a tutte le persone che in questi anni hanno contribuito alla mia crescita personale e professionale con il loro instancabile supporto.

In primis, un ringraziamento speciale al Prof. Roberto Maja, per il suo fondamentale contributo alla mia preparazione accademica di questi anni e per il suo ruolo di guida nello sviluppo dell'elaborato di tesi. Ringrazio inoltre il Prof. Marco Diana, correlatore della tesi, per i suoi preziosi consigli e commenti e per la sua immensa disponibilità e attività di supporto.

Senza il contributo della mia famiglia tutta, Alessia, Alfredo, Anna, Giorgia, Massimo e Tiziana non sarei mai potuto arrivare a questo. Il ringraziamento più grande va a loro, per avermi trasmesso i valori e le aspirazioni che hanno condotto a questo traguardo.

Un particolare ringraziamento va inoltre a tutti i miei colleghi e amici che in questi anni hanno condiviso con me il percorso accademico. Un grazie a Carolina, Luca, Maria e a tutti i miei colleghi dell'Università "La Sapienza" per il loro affetto e per la complicità che ci ha reso un gruppo di amici, prima che compagni di corso, a Chiara, Edoardo, Federico, Flaminia e Michela per il tempo passato assieme, per aver reso così leggero un momento della mia vita pieno di aspettative e tensioni, per le esperienze vissute e quelle da vivere, a Chiara, Derick e Guido, che a 20000 Km da casa hanno condiviso con me sogni e aspirazioni, felicità e preoccupazioni, insegnandomi che certi legami non si fermano di fronte a 24 ore di volo. Un grazie a Francesco, Irio, Paolo e tutta la Residenza Torrescalla per avermi accolto a braccia aperte e reso parte di una famiglia senza la quale molto di ciò che ho ottenuto non sarebbe stato possibile.

Infine, un ringraziamento a Costanza, Gabriele, Johnny e Maria Teresa, per essere le persone più importanti che la vita mi abbia fatto incontrare, quel punto di riferimento a cui aggrapparsi quando ne hai bisogno.

E un grazie agli amici di una vita, a Chiara, Federico, Gabriele e Roman, quella parte di famiglia che ti scegli e che avrai accanto una vita intera.

Non finirò mai di ringraziarvi per avermi permesso di arrivare fin qui.

Guglielmo

Glossario

A-VDGS Advanced Visual Docking Guidance System.

A-VGDS Advanced-Visual Guidance Docking Systems.

A-CDM Airport Collaborative Decision Making.

ACI Airport Council International.

ADS-B Automatic Dependent Surveillance - Broadcast.

APTR Alternative Parallel Taxi Route.

A-SMGCS Advanced - Surface Movement and Guidance Control Systems.

ATC Air Traffic Control.

CATCC Conflicting ATC Clearances.

CMAC Conformance Monitoring Alerts for Controllers.

EIBT Estimated In-Block Time.

EUROCONTROL Organizzazione europea per la sicurezza della navigazione aerea.

FAA Federal Aviation Organization.

FtG Follow The Green.

HMI Human Machine Interface.

IATA International Air Transport Association.

ICAO International Civil Aviation Organization.

IFALPA International Federation of Air Line Pilots' Associations.

ILS Instrumental Landing System.

IMO International Maritime Organization.

ITU International Telecommunication Union.

ITWP Integrated Tower Working Position.

LRST Local Runway Safety Teams.

LVC Low Visibility Conditions.

LVP Low Visibility Procedures.

MLAT Pseudo Range Multilateration.

MTOW Maximum Take-off Weight.

RAAS Runway Awareness and Advisory System.

RMCA Runway Monitoring and Conflict Alerting.

RPA Runway Protected Area.

SATR Standard Airport Taxi Routes.

SESAR Single European Sky ATM Research.

SGCM Surface Movement and Guidance Control Systems.

SMR Surface Movement Radar.

SSR Secondary Surveillance Radar.

TCL Taxiway Centreline Lights.

TOT Target Take-off Time.

WAM Wide Area Multilateration.

WHO World Health Organization.

WMO World Meteorological Organization.

Indice

I	La circolazione a terra: stato dell'arte di un problema complesso	3
1	Recenti evoluzioni della circolazione a terra	7
1.1	Il complesso normativo	8
1.1.1	Il ruolo dell'ICAO	8
1.1.2	Il ruolo dell'EUROCONTROL	8
1.2	La comunicazione terra-aereo in ambito aeroportuale	10
1.2.1	Breve storia degli strumenti di comunicazione aeroportuale	10
1.2.2	Tendenze di innovazione nell'ambito comunicazione a terra	10
1.2.3	La comunicazione nei sistemi di trasporto	11
1.3	Metodi di quantificazione delle inefficienze	14
1.3.1	Consumo di carburante	14
1.3.2	Impatto ambientale	18
1.3.3	Rullaggio e ritardi	22
1.3.4	Collisioni e Runway Incursion	23
2	Le tecnologie implementate	31
2.1	I sistemi SMGCS	32
2.2	Introduzione al sistema A-SMGCS	35
2.3	Principi generali dell'A-SMGCS	37
2.3.1	Servizio di sorveglianza	37
2.3.2	Servizio di supporto di sicurezza	38
2.3.3	Servizio di Routing	42
2.3.4	Servizio di Guidance	43
2.4	Hardware e software	46
2.5	Algoritmi di routing	49
2.6	Vantaggi dell'A-SMGCS	53
2.6.1	A-SMGCS: cosa manca	53

3	La capacità di un aeroporto	57
3.1	La capacità totale	58
3.1.1	Determinazione della capacità totale	59
3.2	La capacità dei sistemi di circolazione a terra	65
3.2.1	La circolazione a terra nel panorama aeroportuale	65
3.2.2	Determinazione della capacità per i sistemi di circolazione a Terra	66
3.2.3	Metodologia di approccio del lavoro di tesi	67
3.3	Progettazione di un sistema A-SMGCS	68
3.4	Considerazioni finali	71
3.4.1	Problematiche nelle ore di punta	71
3.4.2	Problematiche nelle ore di morbida	71
II	Il Caso Studio: L'aeroporto di Malpensa	73
4	Presentazione dell'aeroporto	77
4.1	Analisi dei Movimenti a Terra	82
4.2	L'adozione della Procedure A-CDM	89
4.3	Considerazioni e Definizione degli Obiettivi	91
4.4	Configurazione generale del sistema proposto	93
5	La circolazione "in stazione"	97
5.1	Il sistema a blocchi: lunghezza delle sezioni	99
5.2	Configurazione generale del sistema	103
5.2.1	Visual Docking Systems	105
5.2.2	Taxiway e luci di bordo pista, stopbars	107
5.3	Funzionamento del sistema	109
5.3.1	Osservazione	109
5.3.2	Programmazione itinerario	110
5.3.3	Verifica di Liberazione degli Enti	112
5.3.4	Manovra degli elementi	114
5.3.5	Verifica di configurazione degli enti	115
5.3.6	Bloccamento degli enti	115
5.3.7	Apertura del segnale di manovra	115
5.3.8	Liberazione elastica dell'instradamento	116
5.3.9	Funzionamento per conflitti con voli in taxi-in	117
5.4	Sicurezza	119
5.5	Considerazioni	121

6	La circolazione “in linea”	123
6.1	Configurazione e Layout della soluzione	124
6.1.1	Entrata in Runway 35L	129
6.1.2	Ingresso in Runway 35R	131
6.1.3	Taxiway link Charlie - Delta	131
6.2	Funzionamento del sistema in rettilineo	133
6.2.1	Sorveglianza	135
6.2.2	Controllo	136
6.2.3	Guidance	143
6.3	Funzionamento Guidance in Intersezione	146
6.3.1	Rischi e Differenze rispetto alla Circolazione in Rettifilo	146
6.3.2	Stopbars e Luci di Taxiway Direzionali	146
6.3.3	Configurazione e Layout della Soluzione per i Decolli 35R e 35L	148
6.3.4	Configurazione e Layout della Soluzione Per l’Interse- zione con l’Uscita ad Alta Velocità dalla 35R	150
6.3.5	Configurazione della Soluzione per i Conflitti con i Voli Cargo Provenienti dal Nuovo Terminal	151
6.4	Ottimizzazione dei Profili di Velocità	153
6.4.1	Modello Matlab	154
6.4.2	Comunicazione della velocità ottima al pilota	170
6.5	Sistemi di Sicurezza	172
6.5.1	RMCA e CMAC	172
6.5.2	CATCC	173
6.6	Concatenamento Dinamico Delle Sezioni	174
6.7	Considerazioni	177
7	Human Machine Interface	179
7.1	La torre di controllo di Milano Malpensa	180
7.2	Configurazione HMI proposta	181
8	Valutazione di efficienza	185
8.1	Metodologia di Approccio	186
8.2	Creazione Matrice O/D	187
8.2.1	Percorsi di Ottimizzazione	193
8.3	Aumento delle Prestazioni	195
8.3.1	Percorso T1-Runway 35R	196
8.3.2	Percorso T2-Runway 35R	200
8.3.3	Percorso T2-Runway 35L	203
8.4	Tabelle Riassuntive	204
8.5	Formulazione Proposta per la Taxiway Charlie	207

9	Conclusioni	209
A	L'Odierna Gestione del Sistema a 4 Fasi	213
A.1	Sorveglianza	213
A.2	Controllo	214
A.3	Routing	215
A.4	Guidance	217
A.5	A-CDM	217
A.6	Impatto Ambientale	217
B	Livelli di Implementazione A-SMGCS	219
C	Low Visibility Operational Map	221
D	ICAO Engines Database	223
E	Codice Matlab	229
E.1	Frame Principale del Programma	231
E.2	Fuel flow	233
E.3	Emission plot	234
E.4	Input analysis	235
E.5	Taxiway optimum	236
E.5.1	Cinematic	238
E.5.2	Emission index	240
E.6	Opt diagram	241
E.7	Opt exp diagram	244
E.8	Scenarios	246
	Bibliografia	253

Elenco delle figure

1.1	Relazione tra il Fuel Flow e la potenza di funzionamento . . .	17
1.2	Esempio di Profilo di Velocità	18
1.3	Fase di moto causa delle emissioni dei principali inquinanti . .	19
1.4	Determinazione dell'Emission Index	21
1.5	Tabella per i costi degli inquinanti per i diversi paesi dell'U- nione	21
1.6	Prestazioni del Personale di Controllo	24
1.7	Rimborsi Assicurativi Annuali	26
1.8	Cause principali di Runway Incursion	28
2.1	Apparecchi di sistema per Guidance	32
2.2	Procedure di sistema per Guidance	33
2.3	Procedure di sistema per Guidance 2	33
2.4	Funzionamento del sistema A-SMGCS	35
2.5	Tabella di implementazione tecnologie A-SMGCS	36
2.6	Principali Figure e Responsabilità del Servizio di Sorveglianza	38
2.7	Esempio di RPA per l'Aeroporto di Brussels	40
2.8	Principali Figure e Responsabilità del Servizio di Sicurezza . .	41
2.9	Planned Route, Cleared Route, Modified Route	42
2.10	Principali Figure e Responsabilità del Servizio di Routing . . .	43
2.11	Accensione del Centreline	44
2.12	Principali Figure e Responsabilità del Servizio di Guidance . .	45
3.1	Determinazione del MIX INDEX	61
3.2	Esempi di schemi Runway	62
3.3	Determinazione della capacità Runway in IFR	62
3.4	Esempio di Runway con attraversamenti Taxiway	63
3.5	Determinazione della capacità gate	63
3.6	Determinazione della capacità oraria totale	64
3.7	Sistema di Dipendenze della Circolazione a Terra	65
4.1	Dati di Traffico Anno 2018, ENAC	77

4.2	Partecipazioni dirette ed indirette SEA Airports	78
4.3	Dati di Traffico per Milano Malpensa 2018	79
4.4	Layout dell'Aeroporto	80
4.5	Confronto dei Coefficienti di Utilizzazione tra i Principali Aeroporti Europei	81
4.6	Principali Tipologie di Aeromobili in Transito a Malpensa, 2011	82
4.7	Ripartizione Decolli ed Atterraggi per Pista	83
4.8	Ingressi Intermedi della Runway 35L	83
4.9	Procedure Preferenziali di Movimentazione a Terra per il T1 .	84
4.10	Procedure Preferenziali di Movimentazione a Terra per il T2 .	85
4.11	Percorso Preferenziale di Decollo dal T1	85
4.12	Percorso Preferenziale di Atterraggio per il T1	86
4.13	Percorso Preferenziale di Decollo dal T2	86
4.14	Percorso Preferenziale di Atterraggio per il T2	87
4.15	Satellite di mezzo del Terminal 1	87
4.16	Esempio di piazzole in Self-Manouvering	87
4.17	Piazzole in Push-Back, Terminal 2	88
4.18	Presentazione della Procedura A-CDM per SEA Airports . . .	89
4.19	Odierno Schema di Funzionamento della Comunicazione Aeroportuale	91
4.20	Individuazione e Classificazione delle Zone di Conflitto per i Movimenti a Terra	94
4.21	Configurazione del Sistema a Sezioni di Blocco	95
5.1	Innovazione introdotta nel processo di comunicazione nei pressi dell'aerostazione	98
5.2	Generico Diagramma di Trazione adottato per Velivolo in Taxiway	99
5.3	Visualizzazione del franco di sicurezza	101
5.4	Layout delle Sezioni in Corrispondenza del Terminal 1	103
5.5	Layout delle Sezioni in Corrispondenza del Terminal 1 - 2 . . .	104
5.6	Layout tipo Intersezioni	104
5.7	Visual Docking System per Piazzola di Sosta	105
5.8	Configurazioni possibili dei Visual Docking Systems	106
5.9	Configurazione Luci di Taxiway, Particolare di un'Intersezione	108
5.10	Controllo sulla Prescrizione di rullaggio operata tramite barriere a microonde	108
5.11	Esempio di Programmazione Itinerario con HMI dal manuale EUROCONTROL	110
5.12	Esempio di HMI dal manuale EUROCONTROL	111
5.13	Creazione di più itinerari che sfruttano lo stesso percorso. . . .	113

5.14	Configurazione automatica delle sezioni per le precedenze agli incroci.	113
5.15	Configurazioni di Intersezioni Tipo.	114
5.16	Configurazione delle sezioni una volta aver risolto il conflitto in intersezione	116
5.17	Gestione Conflitto con un Aeromobile in Entrata	118
5.18	StopBars Esistenti, Funzione RMCA	119
6.1	Innovazione introdotta nel processo di comunicazione nella circolazione SATR	123
6.2	Configurazione delle sezioni per la zona sud dell'aeroporto	125
6.3	Lunghezze delle sezioni per il raccordo Charlie.	128
6.4	Schema di organizzazione delle sezioni in corrispondenza dell'ingresso Sud-Ovest della Runway 35L	129
6.5	Schema di organizzazione delle sezioni in corrispondenza dell'ingresso Sud-Est della Runway 35L	130
6.6	Schema di organizzazione delle sezioni in corrispondenza dell'ingresso Sud-Est della Runway 35R	131
6.7	Schema di organizzazione delle sezioni in corrispondenza dell'uscita della Runway 35R	132
6.8	Aereo indisturbato in circolazione	133
6.9	Aerei in Circolazione a distanza maggiore di due sezioni di blocco	133
6.10	Aerei in Circolazione con distanza minore di due sezioni di blocco	134
6.11	Aerei incolonnati	134
6.12	Schermata di sorveglianza SMR Aeroporto di Schiphol, Amsterdam	135
6.13	Disposizione delle Barriere a Microonde	136
6.14	Passaggio per il Punto A	137
6.15	Passaggio per il Punto B	138
6.16	Passaggio per il Punto C	138
6.17	Esempio di Costruzione Dinamica del Profilo di Velocità	140
6.18	Rappresentazione dei profili di Velocità di Due Aeromobili in Rullaggio Contemporaneamente	140
6.19	Curva di Sicurezza	142
6.20	Diagramma di Trazione nel Caso di Intersezione con la Curva di Sicurezza	142
6.21	Categorie di Visibilità Definite dall'ENAC	143
6.22	Condizioni di Visibilità dal Regolamento di Scalo di Milano Malpensa	144
6.23	Schema di Funzionamento Luci di Taxiway	144

6.24	Configurazione luci di taxiway per una svolta a sx	147
6.25	Emissione del Segnale di Allarme in Caso di Violazione delle Prescrizioni	147
6.26	Aereo in taxi sul raccordo charlie e diretto alla 35L	148
6.27	Aereo in taxi sul raccordo charlie e diretto alla 35L	149
6.28	Simulazione di situazione di intersezione	150
6.29	Configurazione del sistema nel caso di sopraggiungimento di un aereo da Nord.	151
6.30	Configurazioni di precedenza possibili per l'intersezione con gli aeromobili provenienti dall'area cargo.	152
6.31	SATR per l'aeroporto di Malpensa	155
6.32	Grafico flusso di carburante-spinta di funzionamento	156
6.33	Indici di emissione per i diversi inquinanti	156
6.34	Diagramma di Trazione Generico considerato	157
6.35	Equilibrio delle forze su un aeromobile. Nel modello viene considerata anche l'inclinazione della pista	159
6.36	Ottimizzazione del Consumo di Carburante	162
6.37	Visualizzazione Valori di Ottimo	163
6.38	Ottimizzazione delle Emissioni di NOx	164
6.39	Visualizzazione dei Valori di Ottimo	165
6.40	Boeing 737-800 ed Airbus A380 a Confronto	166
6.41	Diagramma di Ottimizzazione Consumi per Airbus A380	166
6.42	Diagramma di Ottimizzazione Emissioni di NOx per Airbus A380	167
6.43	Visualizzazione delle Prescrizioni di Velocità	170
6.44	Esempio di concatenamento delle sezioni a seconda degli sce- nari di Ottimizzazione per la Taxiway Charlie	176
7.1	Torre di Controllo di Malpensa	180
7.2	Schermata HMI	181
7.3	Ipotesi Rappresentativa di una Porzione della Schermata HMI.	183
7.4	Esempi di HMI	184
8.1	Dati di Affollamento Relativi all'Aeroporto di Milano Malpensa	187
8.2	Percorsi SATR Considerati per la Valutazione del Processo di Ottimizzazione	193
8.3	Ottimizzazione Consumi Percorso T1-35R	196
8.4	Ottimizzazione Consumi Percorso T1-35R, Caso 2	197
8.5	Ottimizzazione Emissioni NOx Percorso T1-35R	199
8.6	Grafici di Ottimo relativi al Percorso T2-35R	201

A.1	Stato delle Tecnologie di Sorveglianza per Milano Malpensa . .	214
A.2	Stato delle Tecnologie di Controllo per Milano Malpensa, RMCA	215
A.3	Stato delle Tecnologie di Controllo per Milano Malpensa, CATCC e CMAC	215
A.4	Stato delle Tecnologie di Routing per Milano Malpensa	216
A.5	Stato delle Tecnologie legate alla fase di Routing per Milano MalpensaC	216
A.6	Stato delle Tecnologie A-CDM per Milano Malpensa	217
A.7	Misure Adottate in Merito all’Impatto Ambientale per Milano Malpensa	218
B.1	Livello 1	219
B.2	Livello 2	219
B.3	Livello 3	220
B.4	Livello 4	220
B.5	Livello 5	220
C.1	Schema delle Procedure in Condizioni di Bassa Visibilità . . .	222
E.1	Frame Principale del Programma	230

Elenco delle tabelle

1.1	Costi Assicurativi delle Compagnie Aeree	25
5.1	Riepilogo dei Risultati per l'Ottimizzazione del Consumo Carburante	102
6.1	Tabella delle lunghezze delle sezioni per la circolazione sul raccordo HOTEL.	125
6.2	Tabella delle lunghezze delle sezioni per la circolazione sul raccordo CHARLIE.	127
6.3	Tabella di riepilogo della lunghezza delle sezioni per l'intersezione considerata	129
6.4	Tabella di riepilogo della lunghezza delle sezioni per la zona di incolonnamento Runway 35L	130
6.5	Tabella di riepilogo della lunghezza delle sezioni per la zona di incolonnamento Runway 35R	131
6.6	Tabella di riepilogo della lunghezza delle sezioni per la zona di attraversamento charlie delta	132
6.7	Riepilogo dei Risultati per l'Ottimizzazione del Consumo Carburante	163
6.8	Velocità Massime Raggiunte per ogni Scenario	165
6.9	Risultati di Ottimizzazione Consumi per Airbus A380	166
6.10	Risultati di Ottimizzazione Emissioni di NOx per Airbus A380	167
6.11	Tabella di Confronto tra Diagrammi di Trazione per l'Ottimizzazione del Tempo di Taxi	167
6.12	Tabella di Confronto tra Diagrammi di Trazione per i Consumi	168
6.13	Tabella di Confronto tra Diagrammi di Trazione per l'Ottimizzazione delle Emissioni di NOx	168
6.14	Tabella di Confronto delle emissioni in diversi scenari di ottimizzazione	168
6.15	Tabella di Confronto delle velocità ottime in diversi scenari di ottimizzazione	169

6.16	Confronto tra Velocità di Consumo Ottimo per Diversi Aeromobili	169
8.1	Valori di Distribuzione dei Movimenti durante la Giornata . . .	188
8.2	Movimenti orari divisi per i diversi terminal	189
8.3	Percentuale di Distribuzione dei Movimenti per pista durante la giornata	189
8.4	Matrice O/D atterraggi per ora di Morbida.	190
8.5	Matrice O/D decolli per ora di Morbida.	190
8.6	Matrice O/D atterraggi per ore notturne.	191
8.7	Matrice O/D decolli per ore notturne.	191
8.8	Numero totale di movimenti su ogni percorso	194
8.9	Confronto tra Scenario Consumo Ottimo e Scenario non Ottimizzato	197
8.10	Confronto tra Scenario Consumo Ottimo e Scenario non Ottimizzato	198
8.11	Confronto tra Scenario Consumo Ottimo e Scenario non Ottimizzato	198
8.12	Confronto tra Scenario Emissioni NOx Ottimo e Scenario non Ottimizzato	199
8.13	Confronto tra Scenario Consumo Ottimo e Scenario non Ottimizzato	200
8.14	Confronto tra Scenario Consumo Ottimo e Scenario non Ottimizzato	200
8.15	Confronto tra Scenario Emissioni NOx Ottimo e Scenario non Ottimizzato	201
8.16	Scenario Ottimizzazione Consumi senza Limite di Velocità . . .	202
8.17	Confronto tra Scenario Consumo Ottimo e Scenario non Ottimizzato	203
8.18	Risparmio Potenziale Annuale	204
8.19	Velocità Massime Raggiunte per ogni Scenario	205
8.20	Velocità Massime Raggiunte per ogni Scenario	206
8.21	Tabella di Confronto delle emissioni in diversi scenari di ottimizzazione	207
8.22	Velocità Massime Raggiunte per ogni Scenario	207