

ΑοΙ
174

Francesco Russo

SOLUZIONE OTTIMA
DI PROBLEMI
DI PIANIFICAZIONE
E CONTROLLO
DELL'ATTIVITÀ DI VOLO

Prefazione di
Giacomo Patrizi



Copyright © MMXI
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Raffaele Garofalo, 133/A-B
00173 Roma
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-4315-8

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: ottobre 2011

Indice

9 *Presentazione* di Giacomo Patrizi

11 *Capitolo I* *Introduzione*

1.1. Premessa – 1.2. Il Problema della Pianificazione dell'Attività di Volo (Flight Activity Scheduling Problem – FASP) – 1.3. Esame della letteratura – 1.3.1. Problemi analoghi di ricerca operativa – 1.3.2. Formulazione teorica del Problema della Pianificazione dell'Attività di Volo – 1.3.3. Modellizzazioni del Problema della Pianificazione dell'Attività di Volo presenti in letteratura – 1.3.4. Modellizzazione del Problema della Pianificazione dell'Attività di Volo nel presente lavoro – 1.4. Scopo del lavoro – 1.5. Svolgimento del lavoro – 1.6. Conclusioni

31 *Capitolo II* *La Pianificazione e il Controllo dell'Attività di Volo Militare*

2.1. Introduzione – 2.2. Vincoli relativi all'impiego degli equipaggi di volo – 2.2.1. Vincoli di consistenza – 2.2.2. Vincoli di impiego – 2.3. Vincoli relativi all'addestramento degli equipaggi di volo – 2.3.1. Iter istruzionale degli equipaggi di volo – 2.3.2. Qualifiche e Livelli addestrativi – 2.4. Vincoli relativi alla flotta di velivoli – 2.4.1. Vincoli dovuti alla flotta – 2.4.2. Vincoli dovuti alla manutenzione – 2.5. Alcuni vincoli fissi del problema – 2.5.1. Vincoli strutturali e

dotazioni organiche – 2.5.2. Ore di volo annuali autorizzate – 2.5.3. Missioni operative – 2.6. Conclusioni

49 Capitolo III

Procedura di Pianificazione e Controllo dell'Attività di Volo per una Forza Armata Aeronautica

3.1. Introduzione – 3.2. L'obiettivo da perseguire nella Pianificazione dell'Attività di Volo e il metodo utilizzato – 3.3. Airline Aircraft Scheduling: "Programmazione dei velivoli" – 3.3.1. Tabella mensile delle rotazioni dei velivoli ("Tabella sullo Scalamento") – 3.3.2. Tabella mensile sullo stato di efficienza dei velivoli ("Tabella Aeromobili") – 3.4. Crew Planning: "Programmazione degli equipaggi" – 3.4.1. Addestramento degli equipaggi (Crew Training) – 3.4.2. Vincoli di impiego degli equipaggi – 3.4.3. Vincoli di consistenza degli equipaggi ("Tabella Equipaggi") – 3.5. Flight Schedule Design: determinazione del "Piano dei Voli" – 3.5.1. Definizione degli Obiettivi da perseguire nel "Piano dei Voli" – 3.5.2. Tabella delle Missioni Addestrative da effettuare – 3.5.3. Piano dei Voli Giornaliero e "draft" Settimanale – 3.6. Ripporto statistico dei dati sull'attività di volo – 3.7. Conclusioni

73 Capitolo IV

Procedure di Pianificazione e Controllo dell'Attività di Volo delle principali Forze Aeree della NATO

4.1. Introduzione – 4.2. Metodi di Pianificazione dell'Attività di Volo dei principali Paesi NATO – 4.3. Metodo di Pianificazione dell'Attività di Volo in uso presso la Canadian Air Force (CAF) – 4.3.1. Introduzione del Metodo della Canadian Air Force – 4.3.2. Sistemi software utilizzati – 4.3.3. Fasi del Metodo della Canadian Air Force – 4.3.4. Unità preposta alla pianificazione – 4.3.5. Periodicità della pianificazione – 4.3.6. Aspetti di particolare interesse del Metodo della Canadian Air Force – 4.3.7. Confronto con il Metodo dell'Aeronautica Militare Italiana – 4.4. Metodo di Pianificazione dell'Attività di Volo in uso presso la Danish Air Force (DaAF) – 4.5. Metodo di Pianificazione dell'Attività di Volo in uso presso la French Air Force (FAF) – 4.6. Metodo di Pianificazione dell'Attività di Volo in uso presso la German Air Force (GAF) – 4.6.1. Introduzione del Metodo della German Air Force – 4.6.2. Sistemi software utilizzati – 4.6.3. Fasi del Metodo della German Air Force – 4.6.4. Unità preposta alla pianificazione – 4.6.5. Periodicità della pianificazione – 4.6.6. Aspetti di particolare interesse del Metodo della German

Air Force – 4.6.7. Confronto con il Metodo dell’Aeronautica Militare Italiana – 4.7. Metodo di Pianificazione dell’Attività di Volo in uso presso la Royal Netherlands Air Force (RNIAF) – 4.7.1. Introduzione del Metodo della Royal Netherlands Air Force – 4.7.2. Sistemi software utilizzati – 4.7.3. Fasi del Metodo della Royal Netherlands Air Force – 4.7.3.1. Piano dei Voli – 4.7.3.2. Programmazione degli Equipaggi di Volo – 4.7.3.3. Programmazione dei velivoli – 4.7.4. Unità preposta alla pianificazione – 4.7.5. Periodicità della pianificazione – 4.7.6. Aspetti di particolare interesse del Metodo della Royal Netherlands Air Force – 4.7.7. Confronto con il Metodo dell’Aeronautica Militare Italiana – 4.8. Metodo di Pianificazione dell’Attività di Volo in uso presso la Royal Air Force (RAF) – 4.8.1. Introduzione del Metodo della Royal Air Force – 4.8.2. Sistemi software utilizzati – 4.8.3. Fasi del Metodo della Royal Air Force – 4.8.4. Unità preposta alla pianificazione – 4.8.5. Periodicità della pianificazione – 4.8.6. Aspetti di particolare interesse del Metodo della Royal Air Force – 4.8.7. Confronto con il Metodo dell’Aeronautica Militare Italiana – 4.9. Metodo di Pianificazione dell’Attività di Volo in uso presso la Spanish Air Force (SpAF) – 4.9.1. Introduzione del Metodo della Spanish Air Force – 4.9.2. Sistemi software utilizzati – 4.9.3. Fasi del Metodo della Spanish Air Force – 4.9.3.1. Piano dei Voli – 4.9.3.2. Programmazione degli Equipaggi di Volo – 4.9.3.3. Programmazione dei velivoli – 4.9.4. Unità preposta alla pianificazione – 4.9.5. Periodicità della pianificazione – 4.9.6. Aspetti di particolare interesse del Metodo della Spanish Air Force – 4.9.7. Confronto con il Metodo dell’Aeronautica Militare Italiana – 4.10. Metodo di Pianificazione dell’Attività di Volo in uso presso l’United States Air Force (USAF) – 4.10.1. Introduzione del Metodo della United States Air Force – 4.10.2. Sistemi software utilizzati – 4.10.3. Fasi del Metodo della United States Air Force – 4.10.4. Unità preposta alla pianificazione – 4.10.5. Periodicità della pianificazione – 4.10.6. Aspetti di particolare interesse del Metodo della United States Air Force – 4.10.7. Confronto con il Metodo dell’Aeronautica Militare Italiana – 4.11. Conclusioni

101 Capitolo V

Formalizzazione del problema di Pianificazione e Controllo dell’Attività di Volo di una Forza Armata Aeronautica

5.1. Introduzione – 5.2. Definizioni preliminari della Pianificazione dell’Attività di Volo – 5.3. Variabili del Modello Matematico – 5.4. Formulazione dei Vincoli del Modello Matematico – 5.4.1. Vincoli logici – 5.4.2. Vincoli relativi all’impiego degli equipaggi di volo – 5.4.3. Vincoli relativi all’addestramento degli equipaggi di volo – 5.4.4. Vin-

colo relativo alla flotta di velivoli – 5.4.5. Considerazioni conclusive sui vincoli del modello – 5.5. Funzione Obiettivo del Modello Matematico – 5.6. Conclusioni

127 Capitolo VI

Metodo di Soluzione del Problema di Pianificazione dell'Attività di Volo

6.1. Introduzione – 6.2. Software utilizzato – 6.2.1. Introduzione – 6.2.2. Procedimento seguito dall'algoritmo di ottimizzazione – 6.2.3. Proprietà caratteristiche dell'algoritmo di ottimizzazione – 6.3. Struttura delle variabili – 6.4. Struttura dei dati – 6.5. Conclusioni

149 Capitolo VII

Risultati della sperimentazione del modello di Flight Activity Scheduling

7.1. Introduzione – 7.2. Problemi della Pianificazione dell'Attività di Volo presi in esame – 7.3. Caratteristiche del modello utilizzato – 7.3.1. Ottimalità delle soluzioni – 7.3.2. Versatilità del modello – 7.3.3. Dimensioni del modello di Flight Activity Scheduling – 7.4. Risultati raggiunti – 7.4.1. Caso n. 1: Test dei Vincoli Logici del Modello – 7.4.2. Caso n. 2: Test del Vincolo relativo alla risorsa Velivoli – 7.4.3. Caso n. 3: Test sui Vincoli di impiego della risorsa Equipaggi – 7.4.4. Caso n. 4: Test sulla complessità del modello – 7.4.5. Caso n. 5: Test del modello matematico rispetto ad una Pianificazione settimanale – 7.5. Conclusioni

197 Capitolo VIII

Conclusioni

8.1. Introduzione – 8.2. Un nuovo Sistema per la Pianificazione Ottima dell'Attività di Volo – 8.3. Raccomandazioni per ulteriori lavori sull'argomento – 8.4. Conclusioni

205 Bibliografia

Presentazione

L'obiettivo di questa monografia è di formulare opportuni modelli matematici e metodi di ottimizzazione per la programmazione dei voli addestrativi degli equipaggi e dei velivoli di una Forza Aerea.

Il problema di ottimizzazione oggetto di studio è formulato come un sistema matematico non lineare e la soluzione viene determinata attraverso algoritmi di sistemi lineari di complementarità risolti direttamente come problemi di programmazione lineare, a variabili miste continue e variabili intere. È stato possibile dimostrare sperimentalmente che questo algoritmo è più efficiente rispetto ai metodi in uso presso diverse Forze Aeree della NATO e la soluzione è ottima in un senso “tecnico” rispetto agli obiettivi prefissati.

Dalla ricerca è anche emerso che, in molti paesi, il problema studiato viene risolto affidandosi a metodologie quasi esclusivamente manuali, a scapito spesso della corretta determinazione della soluzione ottima e del rispetto dei numerosi vincoli che limitano l'impiego delle risorse coinvolte. La crescente complessità di tali problemi, invece, rende necessario l'impiego di metodi efficienti, in quanto i sistemi da risolvere sono di dimensioni troppo elevate per essere risolti in modo efficace manualmente.

Con il presente studio, pertanto, il problema di “Pianificazione dell'Attività di Volo” (*Flight Activity Scheduling Problem*) viene risolto in modo ottimo con un algoritmo matematico. Si tratta infatti di un problema a risorse limitate e ad impiego alternativo e, quindi, risolvibile come problema di ricerca operativa.

Più in dettaglio, il *Flight Activity Scheduling Problem* è stato prima formalizzato in un modello matematico ed è stato poi riformulato in un problema lineare di complementarità; è stato poi utilizzato l'algoritmo di ottimizzazione L.C.P. SOLVE e successivi perfezionamenti, applicati su diversi problemi aventi complessità crescente (dalle 59 variabili del primo caso di studio a 1.636 variabili dell'ultimo problema esaminato).

La validità sperimentale della implementazione è evidente dai piani di volo determinati con L.C.P. SOLVE, risultanti in soluzioni ottime dei problemi, che massimizzano gli obiettivi addestrativi inizialmente fissati e rappresentano le migliori assegnazioni degli equipaggi e dei velivoli efficienti, ai voli da effettuare. L'algoritmo, inoltre, determina questa soluzione in tempi di calcolo limitati, inferiori ai 45 minuti, mentre utilizzando i metodi tradizionali in uso sono necessarie alcune ore di elaborazione, senza peraltro avere la garanzia di aver determinato la soluzione migliore in senso "tecnico".

I diversi casi risolti nella fase di validazione sono una verifica empirica delle capacità del modello matematico formalizzato; in tutti i problemi presi in esame, infatti, le evidenze sperimentali dimostrano l'efficienza della procedura proposta e la robustezza dell'algoritmo di ottimizzazione utilizzato, riducendo tra l'altro in misura considerevole il tempo necessario per produrre il piano ottimale dei voli da effettuare.

Roma, 9 giugno 2011

GIACOMO PATRIZI

Professore di Programmazione Matematica
Dipartimento di Scienze Statistiche
Sapienza – Università di Roma

Capitolo I

Introduzione

1.1. Premessa

I compiti che una Forza Aerea è chiamata ad assolvere, sulla base degli impegni assunti a livello nazionale e internazionale, richiedono l'approntamento di uno strumento aereo che sia bilanciato nelle sue componenti, in grado di operare in modo integrato nello strumento militare nel suo complesso e, soprattutto, capace di operare efficacemente in aderenza alla dottrina d'impiego delle Forze Aeree.

Per realizzare quanto sopra occorre che lo strumento aereo sia efficiente. L'efficienza dello strumento aereo è condizionata dalla quantità delle risorse di cui esso dispone e dal modo in cui le stesse sono impiegate. In un contesto in cui le risorse risultano inadeguate, il loro impiego ottimale diventa un fattore determinante per l'organizzazione.

È questo il caso a cui si assiste nell'attuale contesto in cui le principali Forze Aeree della NATO sono chiamate ad operare; tale situazione è caratterizzata, da un lato, dalla sostanziale invarianza delle risorse assegnate e, dall'altro, dalla crescente richiesta di impiego dei mezzi aerei.

Tra le molteplici attività che influiscono sull'efficienza dell'impiego delle risorse di uno strumento aereo, quella che assume maggiore rilevanza è la Pianificazione dell'Attività di Volo, ossia l'assegnazione degli equipaggi e dei velivoli disponibili alle missioni da effettuare.

Lo scopo di questo capitolo è di descrivere il "Problema di Pianificazione dell'Attività di Volo" (*Flight Activity Scheduling Problem* –

FASP), di fare rilevare la sua importanza per una Forza Aerea, nonché di analizzare la ricerca effettuata dagli studiosi su questo problema.

Di seguito sono descritte le principali metodologie per la risoluzione del problema della Pianificazione dell'Attività di Volo, già presenti in letteratura; di tali metodi si mettono, poi, in evidenza le limitazioni.

L'obiettivo di questo studio, infatti, è di dimostrare che è possibile superare tali limiti tramite un software di programmazione matematica¹, adattato per la sperimentazione al caso di una Forza Aerea, nonché attraverso un nuovo algoritmo che risolve problemi molto più estesi (quest'ultimo sviluppo è ancora in corso di verifica²).

Il presente capitolo, quindi, introduce il problema della Pianificazione dell'Attività di Volo, considerando la sua rilevanza, in generale, nell'ambito dei problemi di pianificazione di una compagnia aerea e, più in particolare, in quelli delle attività di una Forza Aerea (§ 1.2).

È poi esaminata la letteratura che tratta il problema della Pianificazione dell'Attività di Volo (§ 1.3). Si vogliono inoltre presentare gli obiettivi e gli scopi perseguiti nella realizzazione di questo lavoro (§ 1.4), la cui articolazione è descritta nel paragrafo 1.5. Nel paragrafo 1.6, infine, sono presentate le conclusioni del capitolo.

1.2. Il Problema della Pianificazione dell'Attività di Volo (*Flight Activity Scheduling Problem* – FASP)

Per una compagnia aerea il problema di Pianificazione dell'Attività di Volo può essere così riassunto: ogni volo programmato neces-

1. Il software utilizzato per le esigenze del presente studio è stato realizzato da G. Patrizi ed è denominato L.C.P. SOLVE, Patrizi, G., "The Equivalence of an LCP to a Parametric Linear Program with a Scalar Parameter", *European Journal of Operational Research*, n. 51, 1991; Di Giacomo L., E. Argento, G. Patrizi, "Linear Complementarity as a General Solution Method to Combinatorial Problems", *Inform Journal on Computing*, vol. 19, n. 1, pp. 73-79, 2007.

2. Di Giacomo, L., F. Russo, "A reformulation method to solve General Linear Combinatorial Problems as Linear Complementarity Problems", in corso di pubblicazione.

sita di un equipaggio di cabina, solitamente composto da un comandante ed un pilota³.

Programmare gli equipaggi di cabina di una compagnia aerea consiste nel definire le attività di un gruppo di persone, in un certo intervallo di tempo, tenendo conto di un insieme di vincoli e limitazioni derivanti dal loro contratto lavorativo e dai parametri di sicurezza⁴.

Lo scopo della programmazione è assegnare almeno un equipaggio ed un velivolo ad ognuno dei voli previsti dalla compagnia aerea, minimizzando il costo totale di tale programmazione e rispettando i vincoli.

Per una Forza Aerea il problema di Pianificazione dell'Attività di Volo è differente, in quanto non consiste nel determinare il Piano dei Voli ("Flight Schedule") per massimizzare il reddito della compagnia aerea, ma nel massimizzare l'efficienza operativa degli equipaggi attraverso il loro progresso ottimale nell'addestramento.

Si tratta tuttavia di un problema a risorse limitate e ad impiego alternativo, e quindi di un problema di ricerca operativa⁵.

I metodi della ricerca operativa definiscono diversi strumenti di supporto alle attività manageriali di una Forza Aerea che possono coprire svariate attività, fra esse la Pianificazione dell'Attività di Volo⁶.

L'elevata considerazione attribuita dalle compagnie aeree a questo problema scaturisce da due fattori principali:

- la forte incidenza dei costi del personale di volo (retribuzioni, straordinari, trasferte, ecc.);

3. Federal Aviation Administration, "FAA Free Flight Action Plan", Washington, DC., April 1996.

4. Bazovsky, I., "Reliability Theory and Practice", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1961 oppure traduzione a cura di Giuseppe Pizzi "Principi e metodi sull'affidabilità", ETAS KOMPASS S.p.A., Milano 1969.

5. Per Ricerca Operativa si intende "La predisposizione di programmi scientifici di interrogazione su sequenze di dati in modo da alterare tali sequenze in senso prefissato", Patrizi, G., "Applicazioni della ricerca operativa ai problemi di direzione aziendale", 2^a ed. Tomo 1, Dipartimento di Statistica, Probabilità e Statistiche applicate Università degli Studi di Roma "La Sapienza" — Serie C Didattica 1992.

6. Etschmaier, M.M., M. Rothstein, "Operations Research in the Management of the Airlines", OMEGA, vol. 2, N. 2, 1974.

— l'elevatissima concorrenza nel settore⁷.

Si tratta, tuttavia, di un problema di non facile soluzione, in quanto si occupa della programmazione di mansioni umane nel rispetto delle condizioni contrattuali che ne disciplinano l'esecuzione.

Il contratto dei piloti prevede, infatti, una serie complessa di limitazioni studiate con lo scopo di permettere agli equipaggi di attendere al loro lavoro senza significativi rischi di calo nella prestazione professionale, dovuti a fatica o stress.

L'approccio europeo al problema della Pianificazione dell'Attività di Volo comporta la soluzione di problemi interi complessi e di grandi dimensioni con circa 10.000 variabili e migliaia di vincoli⁸.

Per tali motivi lo sviluppo di un sistema capace di realizzare le programmazioni degli equipaggi e dei velivoli ottenendo un elevato livello di utilizzazione degli stessi è tuttora argomento di studio e di ricerca per gran parte delle compagnie aeree esistenti⁹.

Wells dà la seguente definizione dello "schedule planning problem":

Defining what the schedule planning division does is simple: all that is necessary is to take the company's marketing goals for a particular period and turn them into a salable schedule that creates volume of new traffic; beats the compe-

7. Etschmaier, M.M., D.F.X. Mathaisel, "Airline scheduling: An overview", *Transportation Science*, 19, 1985.

8. Lawler, E. L., J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan, D. B. Shmoys, "Sequencing and scheduling: Algorithms and complexity", in: *Handbooks in Operations Research and Management Science*, vol. 4, Logistics of Production and Inventory, S.C. Graves, A.H.G. Rinnooy Kan, P. Zipkin, eds., North-Holland, 1993.

9. L'utilizzo efficiente della flotta di velivoli è assolutamente essenziale per ogni compagnia aerea. Dato uno "schedule of flights", una compagnia aerea deve assegnare differenti tipi di velivoli ad ogni "scheduled flight" e ciò tra un elevato numero di possibili assegnamenti. È necessario fare numerose considerazioni per capire bene questo processo, inclusi i dettagli relativi ai vincoli di manutenzione e a molti altri tipi di vincoli. Luss, H., M. B. Rosenwein, "Operations Research applications: Opportunities and accomplishments", *European Journal of Operational Research*, volume: 97, Issue: 2, March 1, 1997, pp. 220-244.

*tion; makes the most efficient use of personnel, facilities, and aircraft; serves the cities on the system; and earns everincreasing profits. Scheduling may be the most difficult job in any airline*¹⁰.

Il caso di una Forza Aerea, poi, è ancora più complesso, in quanto risolvere il problema della Pianificazione dell'Attività di Volo include la costruzione di programmazioni individualizzate che tengono conto di vari fattori (detti "pre-assignment") quali l'addestramento, le richieste degli equipaggi (come giorni liberi o preferenze su voli/missioni) e il "crew resource management", ossia la necessità di assegnare alle missioni equipaggi composti da personale affiatato.

1.3. Esame della letteratura

Il presente paragrafo ha il duplice scopo di valutare possibili modelli di ottimizzazione che possono essere utilizzati in studi di Pianificazione dell'Attività di Volo e di porre le basi teoriche per la costruzione del modello matematico adottato in questo lavoro.

Dall'esame della letteratura non risulta formalizzata la teoria sulla Pianificazione dell'Attività di Volo, ma dalla Ricerca Operativa emergono metodi adatti alla risoluzione di questo problema¹¹.

1.3.1. Problemi analoghi di ricerca operativa

Tecniche per la risoluzione del problema della Pianificazione dell'Attività di Volo sono suggerite da diverse applicazioni della ricerca operativa. Si considerino, ad esempio, le due seguenti analo-

10. Wells, A.T., "Air Transportation: A Management Perspective", Wadsworth, Belmont, 1994, third edn, p. 254.

11. Conway, R.W., W.C. Maxwell, L.W. Miller, "Theory of Scheduling", Addison-Wesley, New York 1967.

gie: la prima con i problemi di “locomotive scheduling” e la seconda con i problemi di “timetabling”¹².

Una procedura euristica per la risoluzione dei problemi di programmazione (“scheduling problem”), ad esempio è stata realizzata mediante una tecnica di miglioramento locale casuale (“stochastic local improvement”), basata su una procedura di “simulation annealing”¹³.

I risultati ottenuti applicando tale sistema ai problemi di programmazione delle locomotive (“locomotive scheduling problem”) della British Rail, sono stati giudicati molto soddisfacenti; altre implementazioni sono state fatte per i problemi di programmazione degli equipaggi (“crew scheduling”) delle società ferroviarie operanti a Hong Kong¹⁴. In particolare, l’“assignment of locomotives and cars to passenger trains” consiste nel coprire tutte le corse dei treni pianificate, minimizzando i costi, data una flotta composta da diversi tipi di locomotive e di vagoni, nei limiti di alcuni vincoli operativi¹⁵.

L’analogia con i problemi di Programmazione degli Equipaggi di Volo è la seguente:

- le locomotive rappresentano gli equipaggi;
- l’orario dei treni rappresenta l’orario dei voli.

Quindi, come le locomotive devono essere assegnate ai treni programmati sull’orario, così gli equipaggi devono essere programmati sui “flight segment”.

I vincoli di impiego delle risorse sono i medesimi, in più i problemi di Programmazione degli Equipaggi di Volo hanno i vincoli contrattuali.

12. Programmazione degli orari e dei luoghi di svolgimento di attività generiche, in un certo periodo di tempo.

13. Wright, M.B., “Applying Stochastic Algorithm to a Locomotive Scheduling Problem”, *Journal of the Operational Research Society*, vol. 40 n. 2, pp. 187–192, 1989.

14. Chu, S., C., K., “Crew scheduling of light rail transit in Hong Kong: from modeling to implementation”, *Computers & operations research*, 1998.

15. Desaulniers, G., J.F. Cordeau, N. Lingaya, F. Soumis, “Simultaneous locomotive and car assignment at VIA Rail Canada”, *Transportation Research*, Part B: Methodological, Volume: 35, Issue: 8, September, 2001, pp. 767–787.

In generale, i problemi di questo tipo appartengono alla famiglia dei “vehicle scheduling problem” che consistono nella pianificazione di un insieme di veicoli per coprire un insieme di “task” ad un costo minimo; inoltre ogni “task” deve essere raggiunto entro un certo intervallo di tempo ed i veicoli possono partire da differenti origini. Altri esempi di problemi di questo tipo sono quelli che riguardano la programmazione delle corse degli autobus urbani (“Urban Bus Scheduling Problem”) e dei trasporti delle merci (“Freight Transport Scheduling Problem”)¹⁶; nella programmazione delle corse degli autobus urbani questi vengono assegnati alle corse da effettuare, mentre nei trasporti delle merci i camion vengono assegnati alle consegne da effettuare. In altri lavori¹⁷ è possibile trovare un ampio studio pubblicato sull’argomento, nonché ipotesi di generalizzazione dei metodi appena menzionati¹⁸.

Altri autori, invece, hanno trattato la risoluzione di problemi di “timetabling” mediante l’uso di tecniche di ottimizzazione lineare¹⁹: “Allocation of Classrooms by Linear Programming”. L’analogia con i problemi della Programmazione degli Equipaggi di Volo è la seguente:

- le aule rappresentano gli equipaggi;
- l’orario delle attività rappresenta l’orario dei voli.

Quindi, nello stesso modo in cui i corsi vengono programmati nelle aule, gli equipaggi vengono programmati sui voli. Le differen-

16. Desaulniers, G., J. Lavigne, F. Soumis, “Multi-depot vehicle scheduling problems with time windows and waiting costs”, *European Journal of Operational Research*, 1998, pp. 479–494.

17. Bianco, L., Mingozzi, A., Ricciardelli, S., 1995, “An exact algorithm for combining vehicle trips”. In: Daduna, J.R., Branco, I., Paixão, J. (Eds.), *Computer-aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 430, Springer, Berlin, pp. 145–172.

18. Bianco, L., Mingozzi, A., Ricciardelli, S., 1994, “A set partitioning approach to the multiple depot vehicle scheduling problem”, *Optimization Methods and Software*, 3, 163–194.

19. Gosselin, K., M. Truchon, “Allocation of Classrooms by Linear Programming”, *Journal of the Operational Research Society*, vol. 37, N. 6, pp. 561–569, 1986.

ze sono date dalla natura dei vincoli, nel primo caso di capienza o di finestre temporali, nel secondo caso di impiego, contrattuali, ecc.

1.3.2. Formulazione teorica del Problema della Pianificazione dell'Attività di Volo

I primi tentativi di ricerca strutturata sull'argomento furono fatti alla fine degli anni sessanta²⁰ e furono poi seguiti da numerosi altri lavori negli anni seguenti²¹. Tutti questi studi dimostrano la varietà di approcci utilizzati fino agli anni ottanta, riguardanti un numero di applicazioni separate, non unite da un'unica teoria.

Agli inizi degli anni Novanta, invece, furono proposte delle formulazioni unificate per i problemi di "vehicle routing" e di "crew scheduling"²².

I primi modelli specifici riguardanti la Pianificazione dell'Attività di Volo sono stati successivamente formulati da Barnhart e Talluri²³

20. Arabeyre, J.P., J. Feamley, C. Steiger, W. Teather, "The airline crew scheduling problem: A survey", *Transportation Science*, 3, 1969, pp. 140-163.

21. Bornemann, D.R., "The evolution of airline crew pairing optimization", *The 22nd AGIFORS Crew Management Study Group Proceedings*, Paris 1982, France. Etschmaier, M.M., D.F.X. Mathaisel, "Aircraft scheduling: The state of the art", *AGIFORS Proceedings*, XXIV, 1984, pp. 181-225 e Etschmaier, M.M., D.F.X. Mathaisel, "Airline scheduling: An overview", *Transportation Science*, 19, 1985, pp. 127-138. Gershkoff, I., "Optimizing flight crew schedules", *Interfaces*, 19, 1989, pp. 29-43. Barutt, J., T. Hull, "Airline crew scheduling: Supercomputers and algorithms", *SIAM News*, 23/6, 1990, pp. 20-22. Teodorović, D., "Airlines Operations Research", *Gordon and Breach Science Publishers*, New York.

22. Desaulniers, G., J. Desrosiers, I. Ioachim, M.M. Solomon, F. Soumis, "A unified framework for deterministic time constrained vehicle routing and crew scheduling problems", *Les Cahiers du GERAD*, G-94-46, École des Hautes Études Commerciales, Montréal, Canada, 1994, H3T 1V6. Desrosiers, J., Y. Dumas, M.M. Solomon, F. Soumis, "Time constrained vehicle routing and scheduling", in: M. Ball, T. Magnanti, C. Monma, G. Nemhauser (eds.), *Handbooks in Operations Research and Management Science*, volume 8 on Network Routing, Elsevier Science, Amsterdam 1995, pp. 35-139 e Desrosiers, J., M.M. Solomon, F. Soumis, A. Lasry, D. McInnis, "ALTITUDE: The airline operations management system at Air Transat", *Les Cahiers du GERAD*, G-95-23, École des Hautes Études Commerciales, Montréal, Canada, 1995, H3T 1V6.

23. Barnhart, C., K. T. Talluri, "Airlines operations research". In: McGarity, A., E., ReVelle C., editors, "Design and operation of civil and environmental engineering systems", New York, Wiley, 1997, pp. 435-469.

seguiti poi da numerosi altri lavori scientifici elaborati in questa specifica materia.

Analizzando i numerosi articoli scientifici scritti su questo argomento è possibile suddividere il problema della Pianificazione dell'Attività di Volo in quattro fasi principali:

- Programmazione dei Voli (“Flight Schedule Design”);
- Assegnazione della Flotta (“Fleet Assignment”);
- Programmazione delle Manutenzioni dei Velivoli (“Aircraft Maintenance Routing”);
- Programmazione degli Equipaggi (“Crew Planning”).

Nella fase di Programmazione dei Voli, l'obiettivo nel definire un Piano dei Voli (“Flight Schedule”) è di trovare un insieme di tratte di volo, caratterizzate da un'origine e una destinazione, per massimizzare i profitti, nel rispetto dei vincoli imposti dalla composizione della flotta Velivoli e dalla forza Equipaggi.

In alcuni lavori²⁴ è descritta più in dettaglio questa fase della Pianificazione dell'Attività di Volo, per la determinazione della quale molte compagnie aeree si affidano principalmente a metodi quasi esclusivamente manuali²⁵.

Nel passo della pianificazione relativo all'Assegnazione della Flotta avviene l'assegnazione dei Velivoli ai tipi di voli, allo scopo di massimizzare i profitti e di assicurare che siano soddisfatti i vincoli relativi al bilanciamento dei voli, alla loro copertura, all'ammontare della flotta e alla manutenzione. Le principali compagnie aeree utilizzano complessi strumenti di ottimizzazione per effettuare l'assegnazione delle attività di volo delle proprie flotte²⁶.

24. Etschmaier, M. M. & Mathaisel, D. F., “Airline scheduling: An overview”, *Transportation Science*, 19(2), 1985, pp. 127–138.

25. Gopalan, R., K. T. Talluri, “Mathematical models in airline schedule planning: a survey”. In: Burkard, R., E., T. Ibaraki, W. R. Pulleyblank, editors, “*Mathematics of industrial systems*”, Vol. III, Annals of Operations Research 1998, Vol. 76, pp. 155–185.

26. Hane, C., A., C. Barnhart, E. J. Johnson, R. E. Marsten, G. L. Nemhauser, G. Sigismondi, “The fleet assignment problem: solving a large-scale integer program”, *Mathematical Programming*, 1995, Vol. 70, pp. 211–232.

Un lavoro a riguardo descrive il processo di pianificazione in uso presso l'USAir e suddivide il problema in sette sotto-processi tra loro distinti²⁷. La fase di Programmazione delle Manutenzioni dei Velivoli ha lo scopo di determinare un insieme di rotazioni dei velivoli (cosiddetto "scalamento") in modo da massimizzare i ricavi e soddisfare i vincoli di manutenzione²⁸. Un approccio euristico a questa fase della Pianificazione dell'Attività di Volo è descritto in un lavoro degli inizi degli anni novanta, in cui viene presentato un modello per la soluzione di problemi di piccole dimensioni²⁹.

Il processo di Programmazione degli Equipaggi si distingue a sua volta in tre sottoprocessi:

- Assegnazione degli Equipaggi ai singoli Voli ("Crew Pairing");
- Assegnazione degli Equipaggi alla Pianificazione dei Voli ("Crew Assignment" o "Crew Rostering");
- Ripianificazione degli Equipaggi ("Crew Recovery")³⁰.

L'obiettivo dell'Assegnazione degli Equipaggi ai Voli è di minimizzare i costi degli equipaggi e, allo stesso tempo, di coprire tutti i voli pianificati, rispettando parte dei vincoli relativi agli equipaggi³¹.

L'Assegnazione degli Equipaggi alla Pianificazione dei Voli consiste nell'assegnare i "pairing" (ossia i voli costituiti da più tratte) alle

27. Rushmeier, R. A. & Kontogiorgis, S. A., "Advances in the optimization of airline fleet assignment, Technical report", USAir Operations Research Group, 1996. In: *Transportation Research*, 1997.

28. Gopalan, R., K. T. Talluri, "The aircraft maintenance routing problem", *Operations Research*, 1998, 46, pp. 260-271.

29. Ghobrial, A., Balakrishnan, N. & Kanafani, A., "A heuristic model for frequency planning and aircraft routing in small size airlines", *Transportation Planning and Technology*, 16, 1992, pp. 235-249.

30. Barnhart, C., E. J. Johnson, G. L. Nemhauser, P. H. Vance, "Airline crew scheduling". In: R. W. Hall, editors, *Handbook of transportation*, Boston, Kluwer in preparation.

31. Desaulniers, G., J. Desrosiers, Y. Dumas, S. Marc, B. Rioux, M.M. Solomon, F. Soumis, "Crew pairing at Air France", *European Journal of Operational Research*, 1997, pp. 245-259.

linee di lavoro, e prende in considerazione la necessità di prevedere sufficienti periodi di riposo tra i voli e di soddisfare i vincoli sulle regolamentazioni in vigore; una linea di lavoro generalmente copre un periodo di un mese³².

La Ripianificazione degli Equipaggi, infine, risolve le interruzioni che intervengono nella pianificazione degli equipaggi, dovute ad irregolarità operative risultanti da problemi di manutenzione o da cattive condizioni meteorologiche³³.

I problemi di Assegnazione degli Equipaggi ai singoli Voli (“Crew Pairing”) sono parzialmente risolti da procedimenti di ottimizzazione, mentre i problemi di Assegnazione degli Equipaggi alla Pianificazione dei Voli (“Crew Assignment” o “Crew Rostering”) sono spesso risolti manualmente³⁴.

Solo pochi lavori pubblicati, infatti, trattano la modellizzazione del problema di Assegnazione degli Equipaggi, applicata al campo delle compagnie aeree³⁵. Tuttavia, la necessità di metodi efficienti per la generazione computerizzata di Assegnazioni efficienti degli Equipaggi aumenta sempre più, per la crescente complessità di tali problemi, di dimensioni troppo elevate per essere risolti in modo efficace manualmente³⁶.

32. Barnhart, C., E.L. Johnson, R. Anbil, L. Hatay, “A column generation technique for the long-haul crew assignment problem”. In: T.A. Cirani, R.C. Leachman, editors, “*Optimization in industry*”, Vol. 2, Chichester, Wiley, 1994, pp. 7–23.

33. Song, M., G. Wei, G. Yu, “A decision support framework for crew management during airline irregular operations”. In: G. Yu, editors, “*Operations research in the airline industry*”, Boston, Kluwer, 1998, pp.259–286.

34. Anbil, R., C. Barnhart, L. Hatay, E. J. Johnson, V. S. Ramakrishnan, “Crew pairing optimisation at American airlines decision technologies”. In: T. A. Cirani, R. C. Leachman, editors, *Optimization in industry*, Chichester, Wiley, 1993, pp.31–36; Hoffman, K., L., M. Padberg, “Solving airline crew scheduling problems by branch-and-cut”, *Management Science*, 1993, Vol. 39, pp. 657–682; Vance, P., H., C. Barnhart, E. L. Johnson, G. L. Nemhauser, “Airline crew scheduling: a new formulation and decomposition algorithm”, *Operations Research*, 1996, Vol. 45, pp. 188–200.

35. Dawid, H., J. König, C. Strauss, “An enhanced rostering model for airline crews”, *Computers & Operations Research*, 28, 2001, pp. 671–688.

36. Suhl, L., “*Computer Aided Scheduling: an Airline Perspective*”, Deutscher Universitäts Verlag, Wiesbaden 1995.

1.3.3. Modellizzazioni del Problema della Pianificazione dell'Attività di Volo presenti in letteratura

La formulazione di un modello base di programmazione lineare per il problema di Assegnazione degli Equipaggi (“Crew Assignment”) è stata presentata agli inizi degli anni novanta come generalizzazione di un problema di “set partitioning”³⁷. L’idea centrale di questo modello consiste nella generazione di un grande numero di linee di lavoro per ogni membro d’equipaggio, in accordo ai requisiti richiesti. Allo scopo di ottenere una soluzione ammissibile, una selezione di queste linee di lavoro deve essere effettuata in modo da assicurare che ogni membro d’equipaggio sia assegnato esattamente ad una linea di lavoro e che ogni segmento della linea di lavoro (ossia ogni tratta di volo o “pairing”) sia coperto dal numero richiesto di membri dell’equipaggio. Al fine di ridurre il numero di linee di lavoro che sono generate da tale metodo, il modello potrebbe essere “rilassato” per permettere la sovra-copertura di certi “pairing”³⁸.

La complessità del Problema di Assegnazione degli Equipaggi schematizzato con il modello appena illustrato risulta molto elevata per vari motivi:

- un segmento della linea di lavoro (“pairing”) potrebbe coprire un periodo di diversi giorni;
- una linea di lavoro è generata per una persona specifica con specifiche necessità;
- a seconda del tipo di velivolo, è richiesto un numero variabile di equipaggi con abilitazioni specifiche;
- le dimensioni di un Problema reale di Assegnazione degli Equipaggi di una compagnia aerea sono elevate e l’insieme di dati è tipicamente di notevoli dimensioni.

37. Ryan, D.M., “The solution of massive generalized set partitioning problems in aircrew rostering”, *Journal of the Operational Research Society*, 1992, 43, pp. 459–467.

38. Dawid, H., J. Konig, C. Strauss, “An enhanced rostering model for airline crews”, *Computers & Operations Research*, 28, 2001, pp. 671–688.

Un altro approccio al problema, che utilizza un modello simile, procede all'ottimizzazione attraverso il procedimento della "generazione delle colonne"³⁹. Altri recenti approcci si basano sulla ricerca di soluzioni ammissibili per i singoli membri dell'equipaggio, ma richiedono un tempo di elaborazione troppo lungo, anche per problemi di medie dimensioni (risolvere, ad esempio, un problema con 108 membri di equipaggio richiede più di 5 ore di elaborazione)⁴⁰.

Data l'elevata complessità del problema da risolvere, sono stati costruiti dei modelli basati su Sistemi di Supporto alle Decisioni (Decision Support System – DSS)⁴¹. Con l'applicazione di questi modelli alcuni autori hanno strutturato il problema in differenti strati ("building block") ed hanno realizzato un modello basato su un sistema DSS, denominato "SYNOPSE", per la valutazione dei Piani dei Voli ("Flight Schedule") nel caso di velivoli cargo, tenendo conto dei costi, dei ricavi e dei contributi ai profitti dei singoli voli⁴².

Altri approcci al Problema di Assegnazione degli Equipaggi possono essere trovati in letteratura tra le tecniche che risolvono il problema in modo euristico⁴³.

Tutti i metodi proposti fino a questo punto per la soluzione dei Problemi di Assegnazione degli Equipaggi di Volo, hanno una componente euristica per la determinazione e la selezione di un insieme

39. Gamache, M., F. Soumis, "A method for optimally solving the rostering problem". In: G. Yu editor, "Operations research in the airline industry", Boston, Kluwer, 1998, pp. 124–157.

40. Gamache, M., F. Soumis, D. Villeneuve, "The preferential bidding system at air Canada", *Transportation Science*, 1998, 32, pp. 246–255.

41. Antes, J., L. Camper, U. Derigs, C. Titze, G.–D. Wolle, "SYNOPSE: a model-based decision support system for the evaluation of flight schedules for cargo airlines", Elsevier Science B.V., *Decision Support Systems*, 22, 1998, pp. 307–323.

42. Antes, J., "Structuring the Process of Airline Scheduling", WINFORS Working Paper, University of Cologne, Germany, 1997.

43. Bodin, L., B. Golden, A. Assad, M. Ball, "Routing and Scheduling of Vehicles and Crews: The State of the Art", *Computers & Operations Research*, n. 10, pp. 117–147, 1983. Baker, E., K., L.D. Bodin, W.F. Finnegan, R.J. Ponder, "Efficient Heuristic Solutions to an Airline Crew Scheduling Problem", *AIIE TRANSACTION*, Vol. 11, n. 2, June 1979.

iniziale di tratte di volo⁴⁴. In questa fase di soluzione del problema, infatti, molti autori preferiscono un approccio euristico rispetto ad altri metodi di risoluzione ottima o quasi ottima, in quanto in tal modo è possibile superare più agevolmente alcune complicazioni che scaturiscono dall'elevata complessità del problema da risolvere, a scapito spesso dell'identificazione della soluzione ottima.

Il metodo di soluzione del Problema di Assegnazione degli Equipaggi di Volo attualmente impiegato, in forma manuale o computerizzata, dalle principali Forze Aeree della NATO⁴⁵ è assimilabile ad una procedura euristica realizzata negli anni sessanta per Deutsche Lufthansa⁴⁶ e poi ulteriormente sviluppata per migliorarne l'efficienza⁴⁷. Tale procedura realizza le programmazioni degli equipaggi sulle diverse tratte di volo (o missioni) in base alle programmazioni dei velivoli sulle stesse tratte.

1.3.4. Modellizzazione del Problema della Pianificazione dell'Attività di Volo nel presente lavoro

Nel presente studio viene definita una nuova tecnica per la risoluzione dei Problemi di Pianificazione dell'Attività di Volo (*Flight Activity Scheduling Problem* – FASP), mediante una loro formulazione analitica come problemi di ottimizzazione lineare a variabili miste reali e zero/uno.

Al modello così formulato verrà applicata la procedura di ottimizzazione L.C.P. SOLVE⁴⁸, di cui viene dimostrata l'efficienza per

44. Fanno eccezione solamente i metodi che adottano procedure di "column generation".

45. Questa procedura verrà descritta nei capitoli 3 e 4.

46. Hoss, K., "A Heuristic Model for the Impersonal Phase of Crew Scheduling Problems", *AGIFORS*, n. 4, pp. 147-157, 1964.

47. Griesshaber, R., "A Heuristic Model for the Impersonal Phase of Crew Scheduling", *AGIFORS*, n. 8, pp. 536-548, 1968.

48. Patrizi, G., "The Equivalence of an LCP to a Parametric Linear Program with a Scalar Parameter", *European Journal of Operational Research*, n. 51, 1991. Di Giacomo L., E. Argento, G. Patrizi, "Linear Complementarity as a General Solution Method to Combinatorial Problems", *Inform Journal on Computing*, vol. 19, n. 1, pp. 73-79, 2007.

la soluzione del Problema della Pianificazione dell'Attività di Volo. In questo lavoro, infatti, viene provata l'esistenza di una procedura efficiente per la soluzione ottima del problema qui trattato⁴⁹.

Prendendo, infine, a riferimento un tipico processo di pianificazione dell'attività degli equipaggi e dei velivoli di un Gruppo di Volo di una Forza Armata Aeronautica, questo lavoro dimostra che l'approccio studiato genera soluzioni efficienti che possono essere applicate ad una Forza Aerea per formulare programmi dell'attività di volo degli equipaggi e dei velivoli, su intervalli temporali dati⁵⁰.

1.4. Scopo del lavoro

Vi sono almeno due scopi alla base della formulazione del modello di Pianificazione dell'Attività di Volo definito in questo lavoro.

Un primo scopo è di mostrare che i problemi della Pianificazione dell'Attività di Volo si possono formulare e risolvere come problemi di programmazione lineare, a variabili miste reali e zero/uno.

Un secondo scopo è di definire uno strumento adatto alle Forze Aeree per ottimizzare la Pianificazione dell'Attività di Volo, al fine di massimizzare l'impiego delle risorse utilizzate per l'addestramento del Personale Navigante.

Riassumendo, lo scopo generale del presente lavoro consiste:

- nell'illustrare un nuovo modo di risolvere il Problema della Pianificazione dell'Attività di Volo;

49. Patrizi, G. "Applicazioni della ricerca operativa ai problemi di direzione aziendale", 2^a ed. Tomo 1, Dipartimento di Statistica, Probabilità e Statistiche applicate Università degli studi di Roma "La Sapienza" – Serie C Didattica 1992. Aiserman, M., A., L. A. Gusev, L. I. Rozonoer, I. M. Smirnova, A. A. Tal, "Logic, Automa and Algorithms", Academic Press, New York 1971, cap. 12.

50. Ogni riferimento a situazioni o casi reali è del tutto casuale. Il presente lavoro, infatti, contiene esclusivamente informazioni non classificate.

- nel predisporre il Problema della Pianificazione dell'Attività di Volo come problema di ottimo e risolverlo con un apposito software adattato alle esigenze dello studio⁵¹;
- nel dimostrare che l'approccio applicato nel presente lavoro è più efficiente di quello euristico, attualmente utilizzato dai principali Paesi NATO per la risoluzione del problema.

A tal fine, in questo studio viene elaborato un esempio di programmazione giornaliera sulla base di alcuni processi tipici di pianificazione dell'attività di volo dell'Aeronautica Militare Italiana. Gli obiettivi del presente lavoro si inseriscono, tra l'altro, in un contesto in cui l'impiego ottimale delle risorse è dettato da diverse esigenze ed in particolare:

- dalle ristrettezze di budget finanziario per la difesa e dalla contemporanea necessità di migliorare il rapporto costo–efficacia in tutti i possibili settori ed attività⁵²;
- dalla necessità di introdurre un metodo scientifico per la determinazione degli obiettivi;
- dalla recente emanazione di norme *ad hoc* tese a valorizzare principi quali il conseguimento di risultati rispondenti ad obiettivi e programmi prefissati, nonché l'efficienza e l'efficacia dell'azione amministrativa della Pubblica Amministrazione⁵³.

51. Verrà a tale scopo modificato il software di G. Patrizi L.C.P. SOLVE per la sperimentazione al caso dell'Aeronautica Militare, Patrizi, G., "The Equivalence of an LCP to a Parametric Linear Program with a Scalar Parameter", *European Journal of Operational Research*, n. 51, 1991; Di Giacomo L., E. Argento, G. Patrizi, "Linear Complementarity as a General Solution Method to Combinatorial Problems", *Inform Journal on Computing*, vol. 19, n. 1, pp. 73–79, 2007.

52. "Obiettivi Programmatici Generali – Programmazione dell'Aeronautica Militare per il triennio 2001–2003", Libro Bianco dell'Aeronautica Militare. "Criteri e procedure di programmazione, gestione e controllo delle risorse di funzionamento dell'area logistica di F.A", Direttiva Comando Logistico dell'Aeronautica Militare, Edizione 2001 (non classificato).

53. Decreto Legislativo 29/93, "Razionalizzazione della P.A."; Decreto Legislativo 286/99 "Riordino e potenziamento dei meccanismi di valutazione dei costi, dei rendimenti e dei risultati".

L'attuale quadro politico-economico di riferimento, infatti, è caratterizzato da una generale tendenza verso il contenimento e la razionalizzazione delle risorse disponibili per la difesa, per cui è sempre più necessaria la massima oculatezza nell'impiego delle risorse, affinché dalle stesse possa trarsi il più alto rendimento in termini di produttività.

Le Forze Armate, a tale scopo, hanno recentemente attuato un profondo cambiamento strutturale e procedurale per produrre una maggiore ed efficace attività di pianificazione e programmazione, nonché per un impiego ottimale delle risorse disponibili.

Un'organizzazione militare, infatti, affronta problemi complessi e di notevoli dimensioni per la localizzazione delle risorse, la gestione logistica e del personale⁵⁴.

A dimostrazione di quanto detto si può fare cenno alla prima Guerra del Golfo, durante la quale, i metodi di ricerca operativa hanno avuto un ruolo importante nell'efficienza della pianificazione delle missioni giornaliere effettuate dai velivoli durante il conflitto⁵⁵. Il trasporto di personale, di armamenti e di altri materiali da trasporto per il Golfo Persico è stato quello più consistente della storia del trasporto aereo⁵⁶.

Il compimento con successo di questa operazione ha richiesto l'utilizzo di complessi strumenti di ottimizzazione per coordinare la pianificazione delle risorse necessarie (velivoli, basi aeree ed equipaggi)⁵⁷.

54. Luss, H., M. B. Rosenwein, "Operations Research applications: Opportunities and accomplishments", *European Journal of Operational Research*, Volume: 97, Issue: 2, March 1, 1997, pp. 220-244.

55. Staats, R., "Desert Storm", *OR/MS Today*, December, 1991, 42-56.

56. Nel corso del conflitto, infatti, è stato effettuato il trasporto a destinazione di oltre 350.000 persone e centinaia di migliaia di tonnellate di materiale solo dagli USA, in un periodo di tempo molto ristretto.

57. Nella zona delle operazioni, durante 40 giorni di conflitto, sono state volate più di 100.000 sortite. Per avere un'idea della complessità del lavoro di pianificazione svolto, basta pensare che questo numero di voli è equivalente al volume dell'attività di volo delle principali compagnie aeree, con l'ulteriore complicazione dovuta al fatto che la pianificazione delle sortite durante la guerra cambiava in modo significativo giorno dopo giorno.

1.5. Svolgimento del lavoro

Lo scopo di questo paragrafo è di delineare come il presente lavoro è stato organizzato e descritto nei capitoli dell'elaborato. Lo studio è illustrato mediante otto capitoli, articolati come di seguito indicato.

Dopo aver esaminato, nel primo capitolo, i modelli matematici disponibili in letteratura, nel secondo capitolo sono descritti gli aspetti specifici che caratterizzano la pianificazione e il controllo dell'attività di volo militare.

Definito il problema da risolvere, nel terzo e nel quarto capitolo è stata fatta un'analisi del metodo di risoluzione usato, rispettivamente, dai principali Gruppi di Volo dell'Aeronautica Militare Italiana⁵⁸ e dai principali Paesi appartenenti alla NATO.

Una volta esaminati i metodi disponibili in letteratura e quelli attualmente impiegati dai principali Paesi della NATO, nel quinto capitolo è definita la formulazione matematica del modello lineare realizzato per la risoluzione ottima del problema della Pianificazione dell'Attività di Volo.

Nel sesto capitolo vengono poi descritte alcune caratteristiche del modello matematico formulato per la soluzione del problema ed è introdotta la procedura risolutiva utilizzata, denominata L.C.P. SOLVE⁵⁹.

Nel settimo capitolo è presentata la sperimentazione dei dati; vengono, quindi, descritti i risultati ottenuti da tale sperimentazione ed è fatta un'analisi delle soluzioni ottenute con la metodologia adottata.

Nel capitolo otto, infine, sono tratte le conclusioni del lavoro.

58. Nell'elaborato saranno esposte esclusivamente le informazioni non classificate.

59. Patrizi, G., "The Equivalence of an LCP to a Parametric Linear Program with a Scalar Parameter", *European Journal of Operational Research*, n. 51, 1991. Di Giacomo L., E. Argento, G. Patrizi, "Linear Complementarity as a General Solution Method to Combinatorial Problems", *Inform Journal on Computing*, vol. 19, n. 1, pp. 73-79, 2007.

1.6. Conclusioni

In questo capitolo è stato introdotto il problema di Pianificazione dell'Attività di Volo ed è stata messa in evidenza la sua importanza per le compagnie aeree in generale e, per una Forza Aerea, in particolare.

Sono state inoltre descritte le metodologie esistenti per la risoluzione dei problemi di Pianificazione dell'Attività di Volo, nonché le tecniche di ottimizzazione della ricerca operativa, applicate a problemi analoghi trattati in campo scientifico.

Dopo aver definito il problema della Pianificazione dell'Attività di Volo, sono stati descritti alcuni modelli presenti in letteratura per la trattazione del problema delle compagnie civili e, a fattori comuni, è stata rilevata la concordanza degli autori sulla complessità del problema da risolvere. Inoltre, non è stato trovato alcun modello applicabile all'attività di volo militare, soggetta a relazioni e vincoli significativamente diversi, rispetto alle condizioni formulate nel problema delle compagnie aeree civili.

È stato pertanto introdotto l'approccio proposto nel presente lavoro per la formalizzazione del problema della Pianificazione dell'Attività di Volo militare.

Sono stati inoltre definiti gli obiettivi dello studio presentato in questo elaborato e la sua articolazione in otto capitoli.

In tali capitoli, in particolare, è descritto l'adattamento del software L.C.P. SOLVE⁶⁰ per la risoluzione di problemi di programmazione ottima di equipaggi e di velivoli di una Forza Aerea ed è dimostrata la sua efficienza nella risoluzione di problemi reali.

Per cominciare, nel secondo capitolo è definito il problema della Pianificazione dell'Attività di Volo, con riferimento al caso di una Forza Armata Aeronautica.

60. Patrizi, G., "The Equivalence of an LCP to a Parametric Linear Program with a Scalar Parameter", *European Journal of Operational Research*, n. 51, 1991. Di Giacomo L., E. Argento, G. Patrizi, "Linear Complementarity as a General Solution Method to Combinatorial Problems", *Inform Journal on Computing*, vol. 19, n. 1, pp. 73-79, 2007.

