

**Federico Galbiati**

Classe III, sez. H, Liceo Scientifico “D. Bramante”, Magenta (MI)

# ALGORITMO PER L’OTTIMIZZAZIONE DEI PERCORSI DI VOLO DI DRONI IMPIEGATI PER TRASPORTO MERCI

## RIASSUNTO

Nel presente elaborato si è analizzata una rete logistica basata su UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*), comunemente chiamati “droni”, del tipo di quelli usati per le consegne sperimentali *Prime Air* in USA da Amazon. Non sono stati trovati nella letteratura scientifica studi e algoritmi di ottimizzazione di reti logistiche servite da droni, caratterizzate da vincoli come il numero di colli trasportabili, l’autonomia di volo del drone, la sua distanza dal centro logistico e i relativi tempi di ricarica delle batterie. Si è perciò dapprima modellata una rete logistica usando un opportuno grafo e si è successivamente minimizzato il percorso di consegna tramite un algoritmo di tipo genetico, con cui si è affrontato il problema *TSP* (*Travelling Salesman Problem*), tenendo in considerazione i vincoli citati. L’algoritmo è stato sviluppato in linguaggio *Swift 4* ed è stato usato per effettuare analisi e simulazioni relative a una rete logistica costituita da otto destinazioni situate nei pressi di Milano.

Si è notato che i tempi di consegna per il numero totale di destinazioni diminuiscono sensibilmente con l’aumento della capacità di carico dei droni poiché l’aeromobile può effettuare un maggior numero di consegne prima di rifornirsi al centro logistico. Nel caso analizzato si è notato che il trasporto con droni è più veloce del trasporto terrestre nella distribuzione delle merci per una capacità di carico dell’aeromobile maggiore di 1 collo. Inoltre, nel caso di drone con capacità di trasporto di un numero di colli uguale al numero totale di destinazioni della rete logistica i tempi di consegna si riducono di circa 4 volte rispetto al trasporto terrestre.

## 1. INTRODUZIONE

Aziende come Amazon stanno sperimentando nuove reti logistiche che prevedono in un futuro il recapito delle merci attraverso flotte di UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) ovvero “droni”. Amazon ha depositato un brevetto presso il *US Patent and Trademark Office* [B.1] che prevede addirittura magazzini volanti posti all’altitudine di 14.000 metri in grado di rifornire flotte di UAV che planerebbero a terra solo per effettuare le consegne. Per ora Amazon ha effettuato le prime consegne commerciali utilizzando i tradizionali magazzini terrestri e droni appositamente progettati allo scopo, Fig. 1.1 [W.1].

Tuttavia, allo stato attuale della tecnologia, la capacità di carico e l’autonomia di volo dei droni è ancora limitata e questo pone seri vincoli alla consegna delle merci. È quindi importante usare piani di consegna che minimizzano il tempo totale di volo e il consumo di energia. Non sono stati trovati nella letteratura scientifica studi sulla ottimizzazione dei piani di volo dei droni per la consegna delle merci. L’obiettivo di questo studio è stato pertanto quello di modellare una rete logistica attraverso un grafo e sviluppare un algoritmo di

risoluzione del *TSP* (*Travelling Sales Problem*) per minimizzare i tempi di consegna delle merci, partendo da un centro logistico. Dopo aver enunciato i termini del problema *TSP*, è stato descritto l'algoritmo di analisi sviluppato in linguaggio Swift 4. Tale algoritmo è stato poi applicato a una rete logistica virtuale situata nei pressi di Milano.

## 2. LA TEORIA DEI GRAFI E IL PROBLEMA TSP

La *teoria dei grafi* si occupa di studiare i grafi, oggetti discreti che permettono di schematizzare una grande varietà di situazioni e di processi e di consentirne delle analisi in termini quantitativi. Tale teoria è nata nel 1736, anno in cui Eulero diede una soluzione matematica del noto problema dei sette ponti di Königsberg [W.2]. Ulteriori contributi alla teoria furono aggiunti nell'Ottocento e nel Novecento ma è in anni recenti, grazie alla sempre maggiore potenza di calcolo dei computer, che la teoria dei grafi è diventata un ramo della matematica di cruciale importanza per le sue applicazioni: dalla risoluzione di problemi di trasporto, agli algoritmi usati nei *GPS*, fino all'analisi dei circuiti elettrici e dei social network, con applicazioni nel campo dell'intelligenza artificiale e della sequenza del DNA.

Per la comprensione di questo elaborato è invece opportuno esporre il problema *TSP* (*Travelling Salesman Problem*) o “problema del commesso viaggiatore”, uno dei casi di studio tipici dell'informatica teorica, basato appunto sulla teoria dei grafi. Il nome nasce dalla sua più tipica rappresentazione: *data una rete di città, connesse tramite delle strade, trovare il percorso di minore distanza che un commesso viaggiatore deve seguire per visitare tutte le città una e una sola volta.*

Non esistono algoritmi efficienti per la risoluzione del *TSP*: l'unico metodo di risoluzione è rappresentato dall'enumerazione totale, ovvero nell'elaborazione di tutti i possibili cammini sul grafo per la successiva scelta di quello migliore. Tuttavia, la complessità dell'operazione la rende impraticabile per grafi di dimensioni comuni nei problemi reali: in un grafo di  $n$  nodi, potrebbe essere necessario calcolare, nel caso in cui ogni nodo è connesso con tutti gli altri,  $n!$  possibili cammini.

Gli algoritmi *TSP* si dividono in due categorie:

1. *esatti*, applicabili solo a problemi con un numero di nodi relativamente basso
2. *euristici*, che producono soluzioni probabilmente esatte ma impossibili da provare essere ottimali.

In questo studio si è usato un algoritmo genetico di tipo euristico.

## 3. ALGORITMO “UAV\_LOGISTICS” PER OTTIMIZZARE IL PERCORSO DI VOLO DI DRONI PER TRASPORTO MERCI

L'algoritmo proposto procede in varie fasi di analisi e di creazione dei percorsi, elaborando migliaia di combinazioni contemporaneamente. Si è usato per lo sviluppo il linguaggio Swift 4 con l'utilizzo di varie ottimizzazioni per sfruttare pienamente la potenza di calcolo della CPU. Il modello sviluppato tiene in considerazione alcuni fattori caratteristici del drone (capacità di trasporto, autonomia, tempo di ricarica del velivolo) al fine di effettuare il massimo numero di consegne nel minimo tempo possibile. Con tale modello si può calcolare quindi la miglior successione delle destinazioni, tenendo in considerazione il fatto che il velivolo deve tornare alla sede della logistica dopo un certo numero di consegne per rifornire la sua stiva e per ricaricare le batterie.

Il flusso di lavoro del modello può essere suddiviso in cinque fasi [Fig. 3.1] :

1. Dato un elenco di  $n$  destinazioni viene determinata la distanza tra il luogo di partenza del drone e le singole destinazioni, per eseguire un confronto con l'autonomia del velivolo ed eventualmente eliminare le destinazioni troppo lontane.

2. Data la capacità  $k$  del drone, che corrisponde al numero massimo di colli trasportabili dopo un rifornimento, vengono formate combinazioni di  $k$  destinazioni alla volta in cui il drone può consegnare le merci prima di rifornirsi al centro logistico.

3. A ogni itinerario che contiene le combinazioni di destinazioni identificate al punto precedente viene applicato l'algoritmo genetico *TSP* per determinare il tempo di volo minimo.

4. Viene elaborato un *piano di volo* costituito dall'insieme di combinazioni delle destinazioni (es., per  $n=4$  e  $k=2$ : 1,2-3,4; 1,4-2,3; 1,3-2,4) che permette di garantire la fornitura di merci a tutte le  $n$  destinazioni.

5. Viene infine selezionato tra i piani di volo elaborati nel punto precedente quello con il minimo tempo di volo totale e vengono calcolati parametri come lo stato di carica delle batterie, l'autonomia residua e il tempo totale di consegna delle merci.

Più in dettaglio, con riferimento all'algoritmo riportato nel file "UAV\_Logistics":

1. L'elenco di  $n$  destinazioni (nodi del grafo) sono elencate in un file insieme alle relative coordinate geografiche (latitudine e longitudine), espressi in gradi decimali. Il programma calcola le distanze tra i nodi (rami del grafo). In questa fase il programma effettua un controllo di compatibilità dell'autonomia del drone rispetto alla distanza dal centro logistico, garantendo la possibilità della consegna della merce e il ritorno alla base del drone.

2. Dato l'elenco di  $n$  destinazioni e la capacità di carico  $k$  del drone, l'algoritmo usa la funzione *findCityCombinations* per determinare tutte le combinazioni di destinazioni senza ripetizioni e senza considerare l'ordine, poiché la successione delle destinazioni di ogni combinazione che minimizza il numero di km percorsi viene calcolata dall'algoritmo TSP nella fase 3.

La formula:

$$C_{n,k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

permette di determinare il numero di combinazioni. Per esempio [Fig. 3.2], con  $n=4$  e  $k=2$ , vengono trovate:

$$C_{4,2} = \frac{4!}{2!(4-2)!} = 6 \text{ combinazioni}$$

Le combinazioni identificate vengono inserite nel vettore *trips*.

3. Utilizzando un ciclo *for* (la cui complessità temporale è  $O(n)$ ), si calcola il tragitto minimo possibile per ciascuna combinazione applicando un algoritmo per la risoluzione del

*TSP*. Si è usato a questo fine un Algoritmo Genetico (*AG*) basato concettualmente sui principi che regolano l'evoluzione naturale delle specie. In particolare si è sviluppato un modello in grado di selezionare le soluzioni migliori e di combinarle fra loro in maniera da farle evolvere verso un punto di ottimo. Si rimanda per una descrizione generale degli *AG* a [W.3].

In questo algoritmo è stata generata una popolazione di destinazioni in un oggetto *Population* nel file *ViewController.swift*. Si è successivamente determinato un percorso di riferimento muovendosi semplicemente alla destinazione più vicina che non è ancora stata visitata, così da generare un percorso di base da usare per comparazione. Tale percorso è stato inserito nell'oggetto *Population* creato precedentemente. È stata quindi creata una nuova generazione di percorsi generando percorsi figli tramite un operatore *crossover* [W.4] e si sono applicate mutazioni casuali a questi nuovi figli. Questo ha aiutato a prevenire troppe soluzioni da evolvere nello stesso percorso [W.5]. Il tutto è stato implementato nel *TravellingSalesmanAlgorithm.swift*.

4. Ogni tragitto minimo calcolato dal modulo *TSP*, corrispondente a ciascuna combinazione di destinazioni identificate al punto 2., viene inserito in un oggetto di classe *Trip* insieme al corrispondente chilometraggio totale del percorso. Tutti gli oggetti *Trip* creati vengono inseriti nel vettore *travelPlans* [Fig. 3.3].

Si usa l'algoritmo, inserito nella funzione *findTPCombinations* basato su calcolo combinatorio per trovare tutte le combinazioni possibili di oggetti di tipo *Trip* senza che vengano accoppiati elementi con stesse destinazioni (senza ripetizioni e trascurando l'ordine).

5. Le combinazioni trovate vengono analizzate con una funzione finalizzata ad identificare la combinazione che ha distanza totale percorsa minima [Fig. 3.4], espressa dalla variabile del piano di volo *overallDistance*, equivalente alla somma di tutte le distanze trovate ed immagazzinate precedentemente dal *TSP* negli oggetti *Trip*. Il piano di volo identificato viene analizzato come segue:

- a) Se la distanza totale coperta dal piano di volo è minore dell'autonomia del drone, vengono calcolati il tempo totale del piano di volo, lo stato di carica finale delle batterie e l'autonomia residua. Si calcola inoltre il tempo totale di consegna delle merci considerando una media di 4 minuti per il ritiro delle merci a ogni destinazione raggiunta;
- b) Se la distanza totale del piano di volo è maggiore dell'autonomia del drone, l'algoritmo provvede a sezionare il piano di volo in tratte parziali, compatibili con l'autonomia del drone, eseguendo l'algoritmo *TSP* sui tragitti modificati per determinarne la miglior successione delle destinazioni in modo da minimizzare la distanza percorsa.

Il programma fa uso della potenza *multi-core* e della tecnologia *multi-threading* delle moderne CPU non solo per diminuire i tempi di creazione delle combinazioni di destinazioni e percorsi di volo, ma anche per determinare con maggiore accuratezza la minima distanza di volo ottenibile tramite l'algoritmo *TSP*. Si è cercato di ottimizzare, almeno in parte, l'utilizzo della RAM, deallocando la quantità di RAM usata dal programma quando non più necessaria.

#### 4. RISULTATI DELL'ANALISI DI UNA RETE DI DESTINAZIONI

L'algoritmo descritto nei precedenti paragrafi è stato applicato a una rete di 8 destinazioni. In Fig. 4.1 sono riportate le destinazioni selezionate per una ipotetica rete logistica servita da un drone con base in un centro logistico situato nei pressi di Milano e il relativo grafo (Fig. 4.2). Per le specifiche tecniche del drone si è fatto riferimento al drone usato da Amazon per il servizio *Prime Air*. Si è considerata un'autonomia del drone di 150 km, una velocità di crociera di 88 km/h e un tempo necessario per la ricarica completa delle batterie di 1 h. Si sono calcolate, variando la capacità di carico (numero di colli trasportabili), le distanze totali percorse dal drone per consegnare le merci nelle 8 destinazioni (Fig. 4.3) e i relativi tempi di consegna (Fig. 4.4). Si è notato un notevole miglioramento dei tempi di consegna all'aumentare della capacità di carico del drone. Infatti, il numero di viaggi al centro logistico per rifornirsi di merci diminuisce all'aumentare della capacità di carico stessa. Si è anche simulato un trasporto convenzionale terrestre, senza limitazioni di capacità, che utilizza il percorso minimo per distribuire le merci nelle 8 destinazioni (Fig. 4.5). Si è notato che il trasporto con droni è più veloce del trasporto terrestre nella distribuzione delle merci per una capacità di carico dell'aeromobile superiore a 1 collo. Si noti che nel caso di drone con capacità di trasporto di un numero di colli uguale al numero totale di destinazioni (8) i tempi di consegna con drone si riducono di circa 4 volte rispetto al trasporto terrestre.

#### 5. CONCLUSIONI

Lo sviluppo e l'applicazione dell'algoritmo UAV\_Logistics ha dimostrato che i tempi di consegna tramite droni diminuiscono sensibilmente con l'aumento della capacità di carico dei droni stessi. Nel caso analizzato si è anche notato che il trasporto con droni è più veloce del trasporto terrestre nella distribuzione delle merci per una capacità di carico dell'aeromobile maggiore di 1 collo. Inoltre si è constatato che, per un drone con capacità di trasporto di un numero di colli uguale al numero totale di destinazioni, i tempi di consegna si riducono di circa 4 volte rispetto al corrispondente trasporto terrestre.

#### RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano la Prof. Lorena De Luigi e la Prof. Emanuela Giaconi, rispettivamente docenti di Matematica e di Informatica presso il Liceo Scientifico D. Bramante di Magenta per i preziosi consigli durante la stesura dell'elaborato.

#### BIBLIOGRAFIA

[B.1] United States Patent US 9.305,280 B1, Airborne Fulfillment Center Utilizing Unmanned Aerial Vehicles for Item Delivery, Apr. 5, 2016

#### WEBGRAFIA

[W.1] <https://newatlas.com/amazon-clarkson-drone-delivery/40641/>

[W.2] <http://www.science.unitn.it/probab/Mathmodels/article-grafi-noslide.pdf>

[W.3] [https://areeweb.polito.it/didattica/gcia/Materiale\\_Didattico/Approfondimenti/Algoritmi\\_Genetici/Colore/Introduzione%20agli%20algoritmi%20genetici.pdf](https://areeweb.polito.it/didattica/gcia/Materiale_Didattico/Approfondimenti/Algoritmi_Genetici/Colore/Introduzione%20agli%20algoritmi%20genetici.pdf)

[W.4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Crossover\\_\(genetic\\_algorithm\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Crossover_(genetic_algorithm))

[W.5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Mutation\\_\(genetic\\_algorithm\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Mutation_(genetic_algorithm))