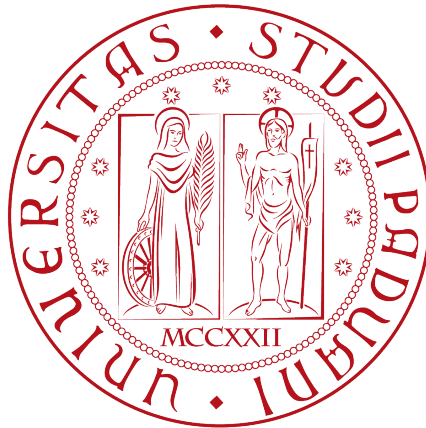


Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI MATEMATICA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INFORMATICA



Algoritmi

basati su programmazione matematica per la configurazione di reti ad-hoc di droni

Tesi di Laurea Magistrale

Relatore

Prof. Luigi De Giovanni

Laureando

Filippo Gamberoni

ANNO ACCADEMICO 2015-2016

“Son qui perché se mi arrendo
questa volta, mi arrenderò tutta la
vita.”

— Alessandro Baricco,
Smith & Wesson

*Al Professor Luigi de Giovanni, per l'opportunità e l'aiuto offerti,
Al Professor Claudio Palazzi, per i consigli sulle reti,
Alla mia famiglia, per il supporto e la pazienza infiniti,
A Valentina, la migliore amica di metà vita,
A Adele, per avermi fatto rialzare tutte le volte,
A Giulia, perché non servono anni per conoscersi da una vita,
Ai Losers, la mia seconda famiglia,
A Andrea, Claudio, Giulia, Marco, Serena e Silvia,
perché la scalata è più bella, se la si affronta insieme,
A Lorenzo, Daniele, Federico, Nicola, Giulio, Giacomo,
Ivan, Alberto, Serena, Valentina e Stefano,
per la bellissima avventura nel laboratorio tesisti,*

A Serena, che senza saperlo, mi ha salvato.

Abstract

In questi ultimi anni i droni sono diventati un argomento di notevole interesse sia di ricerca, sia in ambito applicativo, ed emergono continuamente nuove opportunità di impiego.

Uno dei settori in cui stanno acquisendo maggior importanza è quello che li vede impiegati come unità di supporto alle squadre di primo soccorso, in seguito al verificarsi di calamità naturali. Oltre ad utilizzarli per individuare i dispersi o ispezionare infrastrutture pericolanti, i droni possono venire equipaggiati con Access Points wireless e dislocati nell'area per configurare una Recovery Ad-hoc Flying Network, con lo scopo di instaurare velocemente un sistema di comunicazione d'emergenza e interconnettere gli utenti (come civili o membri delle squadre di soccorso) presenti nell'area. Ciascun utente nel range di un drone potrà quindi comunicare con esso e, tramite multi-hop relaying, con tutti gli altri nodi interconnessi alla rete.

Da questa tipologia di impiego, in continuo sviluppo, emerge un interessante problema di ottimizzazione, che riguarda la determinazione della posizione del minor numero possibile di droni per garantire che tutti i canali di comunicazione tra gli utenti richiesti vengano stabiliti.

Visto l'impiego di canali wireless, la soluzione del problema impone di considerare l'impatto dell'interferenza radio sulle comunicazioni. In questa tesi, definiamo il risultante problema *Interference-aware Drone Ad-hoc Relay Network Configuration problem* (I-DARNC) e proponiamo degli algoritmi di soluzione basati su programmazione matematica. In particolare, proponiamo una formulazione di I-DARNC con un modello di Programmazione Lineare Intera Mista (*Mixed Integer Linear Programming* - MILP).

Al fine di integrare il modello con la rappresentazione degli effetti dell'interferenza, se ne sviluppa un modello basato su misure statistiche degli effetti dell'interferenza stessa sui ricevitori, seguendo uno degli approcci proposti nella letteratura del settore.

Per il modello MILP si considerano diverse varianti, in base ai tipi di interferenza che si considerano rilevanti (interferenza tra droni e/o tra droni e utenti) e alla

eventuale necessità di ottimizzare i flussi di traffico, oltre al numero di droni.

I modelli proposti sono stati implementati in C++, utilizzando le librerie messe a disposizione da CPLEX, uno dei risolutori MILP allo stato dell'arte. I test effettuati su alcune istanze di prova di I-DARNC fanno vedere come solo istanze di piccole dimensioni possano essere risolte in modo ottimo, a causa dell'aumentare delle dimensioni del modello.

Al fine di trovare delle buone soluzioni per istanze di dimensioni elevate, la tesi propone una procedura euristica.

Tale procedura si basa sull'osservazione che, una volta fissate alcune delle variabili, il modello può essere risolto in tempi estremamente ridotti. Pertanto, l'algoritmo proposto nella tesi fissa alcune delle variabili relative alla posizione dei droni e risolve il modello iterativamente. Ad ogni iterazione, le variabili vengono fissate in modo da ridurre il numero di droni utilizzati.

I risultati computazionali discussi nella tesi mostrano come le istanze di prova possano essere risolte in tempi ragionevoli, con valori della funzione obiettivo molto vicini alle soluzioni ottime, quando disponibili.

Indice

Elenco delle figure	ix
Elenco delle tabelle	xi
1 Introduzione	1
2 Contesto tecnologico	5
2.1 Introduzione ai droni	5
2.1.1 Cenni storici	6
2.1.2 Ambiti d'uso	6
2.1.3 Tassonomia	7
2.1.4 Struttura	9
2.1.5 Autonomia di volo	10
2.2 Reti ad-hoc	11
2.2.1 Protocolli di routing	13
2.2.2 Reti Infrastructure VS reti Ad-hoc	14
2.3 Reti FANET	15
2.3.1 Routing nelle FANET	17
3 Formulazione del problema I-DARNC	21
3.1 Scenario	21
3.2 Il grafo della rete	22
3.3 Assunzioni	24
4 Stato dell'arte e strumenti	27
4.1 Stato dell'arte	27
4.2 Interferenza radio	29
4.2.1 Modello di interferenza	29
4.2.2 ns-2 Radio Propagation Model	31

5	Un modello di programmazione lineare intera mista per I-DARNC	35
5.1	Formulazione del modello	35
5.2	Formulazioni alternative	38
5.2.1	Costi di trasmissione	38
5.2.2	Limite sul numero di droni disponibili	38
5.2.3	Limite sul numero di connessioni simultanee	39
5.2.4	Interferenza tra client e droni	39
6	Metodi di soluzione	43
6.1	Metodi esatti	43
6.2	Metodi euristici	44
6.2.1	Euristica Set Y	46
6.2.2	Euristica Binary Y	47
7	Risultati computazionali	49
7.1	Costruzione del dataset	49
7.1.1	Relazione tra dimensione delle istanze e tempi di esecuzione	50
7.2	Risultati	51
7.2.1	Risultati con metodi esatti	51
7.2.2	Risultati con metodi euristici	52
7.2.3	Confronto tra metodi esatti ed euristici	52
8	Conclusioni	63
	Bibliografia	65

Elenco delle figure

2.1	Pilotaggio di un drone militare da remoto.	5
2.2	Kettering Bug, uno dei primi prototipi di UAV militare, 1918. . .	6
2.3	Principali configurazioni di volo dei droni	9
2.4	Schema a blocchi dei principali componenti di un drone	10
2.5	Prototipi di droni ad energia solare	11
2.6	Esempio di comunicazione multi-hop in rete ad-hoc.	12
2.7	Rete Infrastructure (a sinistra) e rete Ad-hoc (a destra).	15
2.8	Tipologie di reti ad-hoc	16
3.1	Backbone di UAVs per connettere gruppi isolati di utenti	22
3.2	Backbone di UAVs per connettere gruppi isolati di utenti	23
4.1	Schema del range di comunicazione di un nodo	30
4.2	Range di comunicazione nello Shadowing Model	32
4.3	Confronto tra il modello di shadowing ns-2 e quello adottato . . .	34
5.1	Il modello MILP I-DARNC.	36
7.1	Tipologie di griglie utilizzate.	49
7.2	Confronto euristiche contro CPLEX	57
7.3	Tempo medio risoluzione per classe di utenti	58
7.4	Tempo medio risoluzione per griglia	58
7.5	Numero medio di droni per classe utenti	59
7.6	Numero medio di droni per griglia	59
7.7	Confronto tempi CPLEX - euristiche	60
7.8	Numero medio di droni per griglia	61
7.9	Numero medio di droni per griglia	61
7.10	Numero medio di droni per griglia	62
7.11	Numero medio di droni per griglia	62

Elenco delle tabelle

2.1	Confronto tra le diverse tipologie di reti ad-hoc	18
4.1	Valori empirici per β	32
6.1	Effetti del fix delle variabili sul tempo di esecuzione	45
7.1	Risultati dataset risolto con CPLEX v12.6.0	53
7.2	Risultati dataset risolto con algoritmi euristici	54
7.3	Confronto tra metodi di risoluzione	56
7.4	Confronto tra le euristiche	57

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi anni i droni hanno ottenuto una grande attenzione, sia in campo militare che civile, grazie soprattutto ai continui progressi tecnologici nella miniaturizzazione delle componenti (elettroniche e non) e alla progressiva riduzione dei costi delle stesse.

Se gli ambiti d'uso in campo militare sono più ristretti e prevedibili (sorveglianza, ricognizione, bombardamento, collegamenti radio), nel campo civile e della ricerca vengono studiati sempre nuovi modi d'impiego. Per esempio, si sta sperimentando l'uso dei droni in campo agricolo per monitorare il raccolto, in campo civile per ispezionare parti di edifici o altre infrastrutture difficilmente raggiungibili, nella raccolta di dati ambientali in zone pericolose per l'uomo o nel trasporto urgente di materiali.

Secondo un recente studio di settore della PwC (una delle compagnie di consulenza più importanti a livello mondiale), si stima che nei prossimi anni il mercato di servizi business basati sull'impiego di droni sarà valutato per oltre 127 miliardi di dollari, principalmente nei settori di infrastruttura (45.2 miliardi) e agricoltura (32.4 miliardi) [1]. La popolarità dei droni sta infatti spingendo sempre più aziende a testarne l'uso per ridurre i costi di manodopera e offrire nuovi servizi. Uno dei ruoli chiave dei droni, in ambito business, è quello di data service, ovvero l'impiego come strumento per raccogliere dati e effettuare mapping di aree.

Un altro ambito di utilità pubblica in fase di studio riguarda l'impiego di droni nel supporto alle squadre di emergenza per la ricerca di superstiti o per stabilire un primo sistema di comunicazione in seguito a disastri ambientali che hanno danneggiato l'infrastruttura di comunicazione tradizionale.

In quest'ultimo caso, infatti, i droni potrebbero venir equipaggiati con dispositivi per la comunicazione Wi-Fi e posizionati, anche in maniera autonoma, per formare la backbone di una rete ad-hoc wireless che consenta comunicazioni dati o

voce tra gruppi di client rimasti isolati a terra.

In questi scenari emerge un interessante e nuovo problema di ottimizzazione, riguardante la configurazione di una rete ad-hoc in cui i droni svolgono il ruolo di relays. In questa tesi proporremo una possibile soluzione a questo problema, sviluppando un modello di programmazione lineare intera mista che determini il posizionamento ottimale di un gruppo di droni, visti come nodi di una rete ad-hoc, in modo da mettere in comunicazione tra loro gruppi sparsi di utenti rimasti isolati. La formulazione proposta, a differenza della letteratura disponibile in questo ambito, integra un modello statico per stimare l'interferenza radio causata dalle trasmissioni dei nodi.

Nel Capitolo 2 forniremo una visione generale d'insieme sui droni, descrivendone la storia, la struttura e le principali tipologie presenti sul mercato, mostrando come differenze apparentemente poco significative come la dimensione, il peso, il tipo di propulsione o alimentazione in realtà impongano forti vincoli sulle funzionalità e gli ambiti d'uso dello stesso. Evidenzieremo inoltre la principale problematica dell'autonomia di volo, e alcuni casi studio che hanno cercato di risolverla. Successivamente metteremo a confronto le reti ad-hoc classiche con le reti di veicoli e di droni, evidenziandone le differenze e le principali problematiche, dal punto di vista dei protocolli di routing, della variazione della topologia di rete e dei vincoli energetici.

Nel Capitolo 3 formalizzeremo il problema I-DARNC (Interference-aware Drone Ad-hoc Relay Network Configuration problem), oggetto di questa tesi. Il problema sarà modellato su un grafo di rete, in cui i nodi sono l'insieme di utenti e droni, e gli archi sono i collegamenti stabiliti tra di loro. Descriveremo inoltre le principali assunzioni che ci permetteranno successivamente di formulare efficacemente il problema tramite modelli di programmazione lineare intera mista.

Nel Capitolo 4 faremo un'analisi dello stato dell'arte sull'impiego dei droni dal punto di vista del networking, mostrando gli studi che hanno affrontato un problema simile al nostro e evidenziandone le principali differenze. Illustreremo anche come le principali problematiche, descritte nel Capitolo 2, sono state affrontate dalla ricerca. In seguito analizzeremo il problema dell'interferenza radio e della difficoltà intrinseca nella sua misurazione e previsione, e proporremo il nostro modello di interferenza basato sullo Shadowing Model del software ns-2, ovvero un noto modello empirico che determina l'attenuazione che un segnale radio subisce a causa di fattori ambientali e ostacoli incontrati.

Nel Capitolo 5 presenteremo il nuovo modello MILP per I-DARNC, descrivendone i vincoli, e le formulazioni alternative più rilevanti emerse durante la sua progettazione. La formulazione proposta è in grado di tenere conto, tramite il

modello di interferenza descritto in precedenza, dell'interferenza tra droni e tra client e droni, rappresentando uno dei contributi della tesi.

Nel Capitolo 6 descriveremo i metodi impiegati per risolvere il modello MILP. In particolare il modello è stato implementato e risolto con il risolutore CPLEX e, inoltre, sono proposte delle euristiche basate su programmazione matematica (Matheuristic). Descriveremo la configurazione di CPLEX adottata, le motivazioni che hanno portato ad essa e le difficoltà incontrate dal risolutore con istanze di dimensioni medio-grandi. Come conseguenza proporremo delle euristiche costruttive, sviluppate per poter risolvere le istanze più complesse, basate sulla risoluzione iterativa di versioni semplificate del modello, ottenute fissando i valori di alcune variabili secondo un criterio che, di iterazione in iterazione, tende a determinare soluzioni con valori migliorativi della funzione obiettivo.

Nel Capitolo 7 descriveremo la metodologia per la definizione di un dataset utilizzato per gli esperimenti numerici, e presenteremo i risultati ottenuti resolvendo le istanze con CPLEX e con le euristiche, confrontandoli in base alla precisione della soluzione e al tempo necessario per ottenerla.

Infine nel Capitolo 8 faremo un riepilogo delle tematiche affrontate in questa tesi, dei risultati ottenuti e suggeriremo le migliorie che potranno essere portate a compimento nei possibili sviluppi futuri del lavoro.

Capitolo 2

Contesto tecnologico

2.1 Introduzione ai droni

I droni, detti anche Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) o Unmanned Aircraft Systems (UAS), possono essere definiti, nella maniera più generale, come dei velivoli aerei privi di equipaggio umano a bordo. Essi vengono pilotati in remoto da personale specializzato a terra (Ground Control Station, Figura 2.1), oppure dispongono di autonomia decisionale. Il volo autonomo è reso possibile tramite tecniche di intelligenza artificiale, utilizzando appositi sensori montati sul drone (come GPS o videocamere) per individuare ostacoli, conoscere la propria posizione e pianificare la rotta, spesso organizzata in waypoints. L'autonomia può essere completa, nel caso in cui tutte le decisioni sul movimento e le azioni sono elaborate dal computer di bordo, oppure parziale, in cui il computer di bordo interviene solo in particolari situazioni, ad esempio quando il drone perde la connessione con il pilota.



Figura 2.1 Pilotaggio di un drone militare da remoto.



Figura 2.2 Kettering Bug, uno dei primi prototipi di UAV militare, 1918.

2.1.1 Cenni storici

Gli UAV sono nati in ambito puramente militare, per compiere missioni offensive o di ricognizione in cui non si poteva garantire l'incolumità del pilota; il loro sviluppo, portato avanti soprattutto dagli Stati Uniti, Israele e dal Regno Unito, ha proseguito di pari passo con la corsa agli armamenti durante le grandi guerre del 1900.

I primi tentativi di realizzare velivoli senza pilota risalgono al periodo della Prima Guerra Mondiale, con l'obiettivo di creare degli "aerei bomba" (Figura 2.2), che in futuro si sarebbero evoluti negli attuali missili teleguidati. Furono perfezionati durante la Seconda Guerra Mondiale, e usati anche come bersagli mobili per addestrare gli addetti alla difesa contraerea, mentre conobbero un forte sviluppo durante i conflitti successivi agli anni '50, in cui vennero impiegati sia come armi offensive che come ricognitori per rimediare alle forti perdite di vite umane subite dall'aeronautica militare.

I droni militari moderni sono nati a partire dagli anni '90: grazie al forte sviluppo dell'elettronica, la miniaturizzazione dei componenti e il conseguente abbattimento dei costi, l'interesse nei loro confronti è cresciuto sempre di più, fino a renderli una componente rilevante in molti eserciti contemporanei [2].

2.1.2 Ambiti d'uso

Come già accennato, in ambito militare i droni sono impiegati principalmente come ricognitori o bombardieri. Un nuovo metodo di impiego li vede coinvolti nel fornire supporto logistico alle truppe a terra, sia come trasporto attrezzatura sia come ponte radio per comunicazioni sicure tra squadre rimaste isolate.

L'impiego dei droni in campo civile invece è estremamente recente, e si studiano continuamente nuovi ambiti in cui poterli impiegare. Generalmente in questo campo si impiegano UAV di dimensioni ben più ridotte rispetto alle controparti militari, spesso veri e propri velivoli aerei.

Oltre allo scopo ricreativo e di fotografia aerea, sono stati impiegati con successo in agricoltura, per monitorare la salute del raccolto (la cosiddetta agricoltura di precisione) o irrigarlo, per ispezionare linee elettriche, condutture o edifici lesionati, nella sorveglianza domestica o di ampie aree geografiche, come supporto alle forze dell'ordine, nel monitoraggio della qualità ambientale dell'aria, come rilevatori di concentrazione di sostanze pericolose per l'uomo in seguito a disastri ambientali, nel supporto alle squadre di soccorso per individuare feriti o dispersi e per portare il prima possibile kit medici e defibrillatori agli operatori sanitari, come corrieri espressi per le spedizioni Amazon [3], contro il bracconaggio e per combattere incendi [4].

2.1.3 Tassonomia

Non esiste un metodo unico per poter categorizzare efficacemente i droni, in quanto essi variano enormemente per caratteristiche tecniche e ambiti di utilizzo. Essi infatti possono essere suddivisi per:

- Ambito:
 - Militare: droni da combattimento, ricognitori, segnalatori di bersagli o esche anti-missile (decoys);
 - Logistico: droni in grado di trasportare merci o attrezzature;
 - Ricerca e sviluppo;
 - Civile e commerciale: modellismo, riprese aeree, raccolta dati, supporto alle forze di soccorso, sorveglianza.
- Altitudine e portata massimi [5] :
 - Portatili: fino a 600 m di altitudine e portata di 2 km;
 - Corto raggio: fino a 1500 m di altitudine e 10 km di portata;
 - NATO e tattici: tra i 3000 e i 5000 m di altitudine e un range massimo di 160 km;
 - Medio ed ampio raggio: fino a 9000 m e oltre i 200 km di portata. Oltre i 9000 m vengono definiti ad ampio raggio;

- Ipersonici: fino a 15000 m, range superiore ai 200 km.
- Dimensione e peso: qui la categorizzazione è meno precisa, in quanto ogni Paese definisce i propri standard:
 - MAV (Micro Air Vehicle): droni che possono stare nel palmo di una mano. Recenti sviluppi hanno portato a modelli grandi pochi centimetri e del peso di alcuni grammi;
 - SUAV (Small UAV): droni sufficientemente piccoli da essere trasportati da una persona e del peso non superiore ai 20-25 kg;
 - HUAV (Heavy UAV): in questa categoria rientrano tutti quei droni la cui struttura è comparabile, in dimensioni, a quella di un velivolo aereo. Hanno elevate capacità di trasporto e possono coprire elevate distanze prima di necessitare di rifornimento. Il loro uso è prevalentemente per scopi militari o di rilevamento.
- Configurazione di volo: determina la struttura, la tipologia di motori e gli ambiti in cui può essere impiegato con maggior efficienza. Le principali versioni sono mostrate in Figura 2.3:
 - Multi-rotori: droni che impiegano più di due rotori per il volo. Hanno avuto ampia diffusione in ambito commerciale e modellistico grazie alla semplicità di costruzione, alla stabilità del volo e alla maggior capacità di carico. Le principali limitazioni sono bassa autonomia di volo e ridotta velocità;
 - Ad ala fissa: sono equipaggiati con ali simili a quelle degli aerei, dispongono di buona autonomia ma non sono capaci di effettuare volo stazionario. Inoltre non sono generalmente in grado di decollare e atterrare in maniera autonoma, richiedendo sistemi simili a catapulte e paracadute;
 - A rotore singolo: dispongono di un solo rotore, rendendoli concettualmente simili a un elicottero. Ciò li rende energeticamente molto più efficienti rispetto ai multi-rotore, a discapito di una maggiore complessità di costruzione e minore stabilità di volo;
 - Ibridi: i più recenti, combinano la struttura ad ala fissa con uno o più rotori, posizionati in coda o verso il suolo, ottenendo i benefici di entrambe le configurazioni.

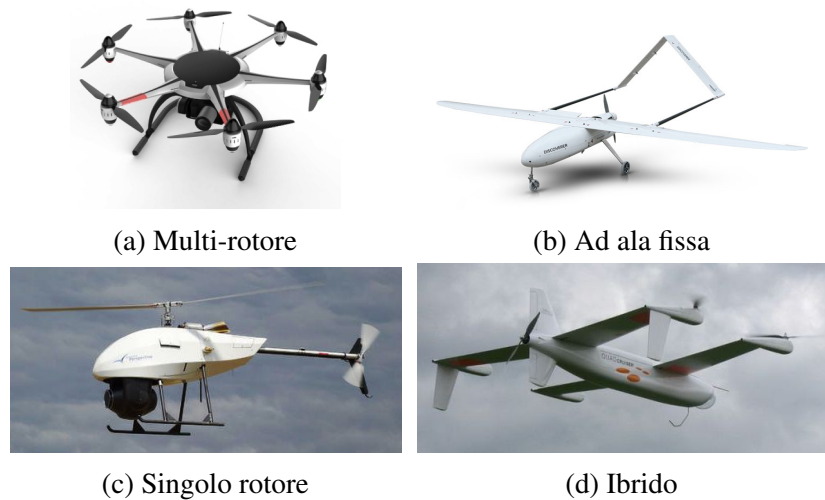


Figura 2.3 Principali configurazioni di volo dei droni

2.1.4 Struttura

La struttura di un drone, evidenziata in Figura 2.4 è generalmente ricorrente, e può essere schematizzata nelle seguenti componenti [6]:

- **Fusoliera:** l'assenza di equipaggio a bordo permette di poterla costruire con materiali più leggeri ed economici. Dimensione e forma variano grandemente in base alla funzionalità del drone e al peso che deve trasportare;
- **Alimentazione:** i droni di ridotta dimensione, come i MAV e gli SUAV, sono generalmente alimentati da batterie, mentre quelli più grandi richiedono i motori convenzionali di un aereo;
- **Sensori:** i sensori che il drone monta ne definiscono le funzionalità e le capacità di volo autonomo. Possono essere usati per raccogliere dati (sensori ambientali, fotocamere, videocamere), per la guida del drone da remoto, per evitare collisioni con ostacoli, per la navigazione autonoma (GPS, giroscopi, altimetri, accelerometri);
- **Attuatori:** sono i dispositivi, generalmente elettronici, che comandano i motori del drone e ne regolano l'assetto;
- **Payload:** è l'equipaggiamento trasportato dal drone, ed include sensori, trasmettenti, attrezzature, armi, etc. Generalmente il payload è contenuto in uno spazio interno apposito, per non influire sulle capacità aerodinamiche del mezzo;

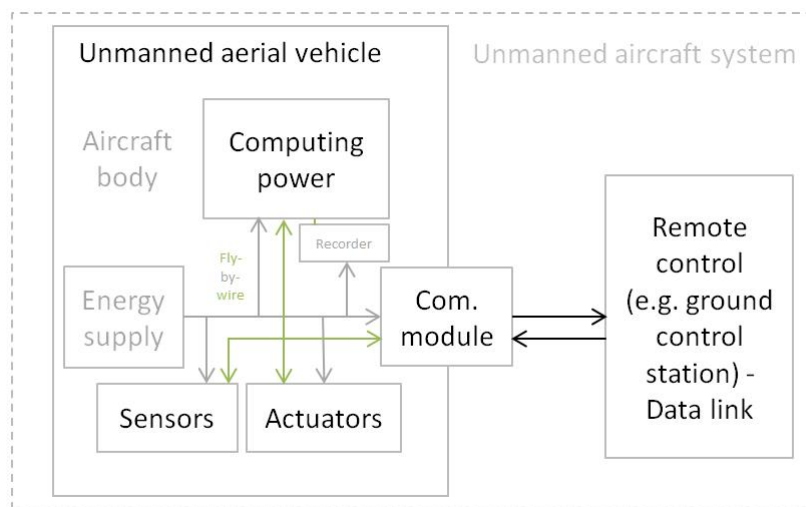


Figura 2.4 Schema a blocchi dei principali componenti di un drone

- **Computer di bordo e software:** i droni sono dispositivi real-time, e sono equipaggiati con una o più unità di calcolo (microcontrollori, single-board computers, sistemi embedded, etc.) per gestire il volo autonomo e i processi di decision-making. Le capacità di elaborazione degli UAV quindi crescono di pari passo con lo sviluppo e la miniaturizzazione dell'hardware;
- **Sistemi di comunicazione:** i sistemi di comunicazione del drone sono generalmente ad onde radio, e possono avvenire con l'operatore a terra in maniera diretta o indiretta (tramite un satellite o un altro velivolo), in base alla reciproca distanza. Il flusso di comunicazione è tipicamente composto in uplink dai comandi dell'operatore, e in downlink da segnali video, telemetria o rilevazioni dei sensori. Molti MAV e SUAV comunicano via Wi-Fi, rendendo possibile pilotarli tramite smartphone o tablet.

2.1.5 Autonomia di volo

Una delle attuali sfide nel mondo degli Small UAV è l'incremento del loro tempo di volo, che generalmente non supera i 10-20 minuti prima di dover effettuare la ricarica della batteria.

Forza del vento, tipologia dei sensori installati, peso del drone e frequenza di movimento sono i principali fattori che incidono sul consumo della batteria. È possibile caricare il drone con più batterie in parallelo, ma più batterie equivalgono a maggior peso da sollevare e a un conseguente maggior consumo di energia da



(a) Multi-rotore solare

(b) Ad ala fissa solare

Figura 2.5 Prototipi di droni ad energia solare

parte dei motori, rendendo quindi risibile il contributo di più batterie alla durata di volo.

Negli ultimi anni è stata esplorata la strada dei pannelli solari come fonte energetica ausiliaria per incrementare l'autonomia di volo (Figura 2.5). I risultati migliori, seppur ancora lontani dall'autonomia energetica, sono stati ottenuti sui droni ad ala fissa [7] ricoprendo le ali di pannelli, mentre sui quadricotteri l'ingombro dell'attrezzatura aggiuntiva causava un effetto vela che riduceva la stabilità in volo [8].

Se in campo commerciale ed amatoriale i risultati sono stati poco incoraggianti, non è andata così nel campo dei grandi velivoli: seppur guidato da un pilota, il progetto Solar Impulse 2, un aereo completamente alimentato dall'energia solare, ha completato il giro del mondo nell'estate del 2016 [9], mentre Facebook sta attivamente testando l'uso di droni solari per fornire connettività a internet ai Paesi del Terzo Mondo con il progetto Aquila [10].

2.2 Reti ad-hoc

Una rete Ad-hoc è una tipologia di WLAN decentralizzata in cui è assente la tradizionale infrastruttura delle reti managed (AP, router, switch, etc.), in quanto sono gli stessi nodi a occuparsene, agendo come routers.

La rete ad-hoc consiste in un gruppo di client mobili che formano spontaneamente una rete temporanea, dinamica e auto-configurante (ad esempio, per comunicare o condividere dati). Ciascun nodo potrà comunicare direttamente con tutti quelli entro il suo range trasmissivo, e tramite multi-hop con quelli al di fuori di esso (Figura 2.6).

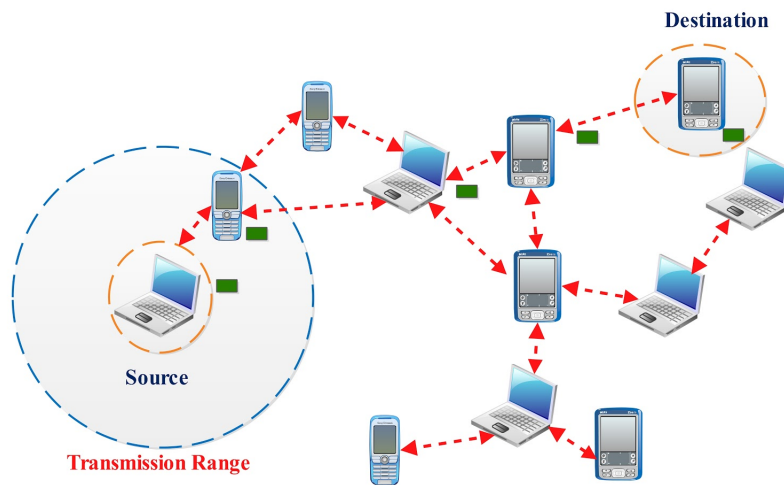


Figura 2.6 Esempio di comunicazione multi-hop in rete ad-hoc.

Poiché i client sono liberi di muoversi, la topologia di queste reti tende a cambiare velocemente e in maniera non prevedibile: possono verificarsi variazioni di routes, partizionamento del grafo di rete, fluttuazioni nella capacità dei link, con conseguente perdita di pacchetti, perciò i protocolli di rete devono avere un alto grado di adattabilità e reattività, per monitorare lo stato dei link e regolare i flussi di traffico di conseguenza. L'assenza di infrastruttura di routing dedicata richiede che il network management sia distribuito tra tutti i nodi, per esempio tramite flussi di traffico di controllo, aggiungendo un ulteriore livello di complessità.

Le reti ad-hoc sono tipicamente impiegate in quelle situazioni in cui l'infrastruttura di rete è assente, inadatta o compromessa: alcuni casi d'uso possono essere la condivisione di dati in un meeting, comunicazioni militari, networking, servizi veicolari (trasmissione di news, intensità del traffico, musica, etc.), gaming, o l'instaurazione di sistemi di comunicazione per le squadre di soccorso in seguito a calamità naturali [11].

I principali vantaggi delle reti ad-hoc sono la capacità di auto-configurazione dei nodi, richiedendo un intervento minimo dell'utente, la velocità di deployment, il self-healing, ovvero la capacità della rete di riconfigurarsi autonomamente in seguito a un cambio della sua topologia, la scalabilità e i costi ridotti dovuti dall'assenza dell'infrastruttura.

I principali svantaggi di questo tipo di architettura sono la necessità di un elevato grado di adattabilità dei protocolli, a causa dei frequenti cambi di topologia nella rete, l'eterogeneità dei client, in quanto le diverse capacità di trasmissione, ricezione e calcolo dei dispositivi possono causare link asimmetrici, la dipendenza

dei client dalla batteria del loro device, la cui durata viene ulteriormente ridotta dalle funzionalità di routing, e la vulnerabilità ad attacchi, a causa dell'assenza di una struttura centrale di autenticazione. [12]

In particolare, anche il power management dei nodi può influenzare la topologia della rete: un client può scegliere se aumentare la potenza di trasmissione (e il suo range, di conseguenza) per spedire direttamente un pacchetto al destinatario, oppure ridurla e fare affidamento sulla consegna multi-hop.

Questa scelta porta alla creazione e cancellazione di path, e alla modifica della topologia. Entrambi gli approcci hanno degli svantaggi: trasmettere a maggior potenza riduce il ritardo nella consegna dei messaggi, ma aumenta il consumo della batteria e riduce il throughput della rete, in quanto all'aumento del range corrisponde un aumento nella zona di interferenza, e tutti i nodi interni a questa area dovranno restare silenti fino al termine della trasmissione; la trasmissione a bassa potenza invece riduce il consumo della batteria e aumenta la capacità della rete, ma incrementa il ritardo medio dei pacchetti perché devono passare per più hop prima di giungere a destinazione.

Generalmente un compromesso viene raggiunto regolando dinamicamente la potenza trasmissiva e creando una condivisione di informazioni tra i protocolli di rete e i layer sottostanti. [13]

2.2.1 Protocolli di routing

I protocolli di routing vengono impiegati per determinare i path più efficienti (in termini di costi, ritardo, consumo energetico, etc.) attraverso i nodi della rete, che permettano ai messaggi di raggiungere la propria destinazione.

Il routing nelle reti ad-hoc deve tenere conto della mobilità dei nodi e delle loro limitate capacità energetiche e di calcolo. Questi due aspetti hanno soluzioni conflittuali, in quanto il primo richiede frequenti scambi di informazioni e aggiornamenti delle tabelle di routing, mentre il secondo li dovrebbe minimizzare, riducendo le trasmissioni e mantenendo tabelle di piccole dimensioni.

Si possono identificare due principali famiglie di protocolli di routing per le reti ad-hoc: protocolli proattivi e on demand.

I protocolli proattivi, di cui fanno parte le famiglie Link State e Distance Vector, effettuano un monitoraggio costante della rete e ne mantengono uno "stato" tramite le tabelle di routing. Al verificarsi di un cambiamento nella topologia, inviano messaggi (control traffic) agli altri nodi con le correzioni da apportare alle tabelle. Permettono un rapido inoltro dei pacchetti grazie alle informazioni sempre aggiornate, ma la presenza costante di traffico di controllo introduce un overhead

che cresce con la frequenza dei cambi di topologia, e in reti molto dinamiche può portare all'impossibilità di tenere traccia di tutti gli aggiornamenti delle stesse. Esempi di protocolli proattivi sono DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector routing protocol), HSLs (Hazy Sighted Link State routing protocol), OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) e STAR (Source Tree Adaptive Routing protocol).

I protocolli on demand (o reattivi), invece, usano un approccio "lazy", cioè non si preoccupano di mantenere una tabella di path aggiornati, ma richiedono il path di destinazione tramite flooding solo all'ultimo momento, quando sono presenti pacchetti che necessitano di essere instradati. Questa tecnica permette una maggior scalabilità e non necessita di traffico di controllo, ma introduce un costante ritardo, detto setup delay, sul primo pacchetto che deve essere spedito a una nuova destinazione (che può diventare gravoso nel caso di traffico intermittente), e rende la rete vulnerabile ad attacchi basati sul flooding. Protocolli reattivi sono AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector routing protocol) e DSR (Dynamic Source Routing) [13].

Vi è poi una terza categoria, i protocolli ibridi, che cercano di combinare i vantaggi delle due famiglie, facendo routing proattivo per un ristretto gruppo di nodi (i nodi iniziali della rete, o quelli considerati più "vicini") e routing on demand su tutti gli altri. Un esempio è il protocollo ZRP (Zone Routing Protocol).

2.2.2 Reti Ad-hoc VS Infrastructure

Lo standard IEEE 802.11 per le Wireless Local Area Network (WLAN) prevede due principali modalità di funzionamento delle reti Wi-Fi: modalità infrastruttura (o managed) e modalità ad-hoc (Figura 2.7).

La modalità infrastruttura, generalmente più diffusa, prevede la presenza di base stations (Wireless Access Points, o APs) cui i client devono connettersi per poter comunicare tra loro. La comunicazione diretta client-client quindi non è ammessa, ma deve essere veicolata passando per l'AP.

Le base station, che svolgono una funzionalità di hub, a loro volta sono connesse, generalmente via cavo, all'infrastruttura centrale della rete e a un router. Esse sono generalmente fisse e forniscono connettività ai nodi client entro il proprio range.

Le reti infrastructure, come dice il nome, si appoggiano a una infrastruttura di rete, perciò sono generalmente pensate con un concetto di permanenza della stessa. La loro installazione e progettazione richiede costi in termini di denaro e tempo,

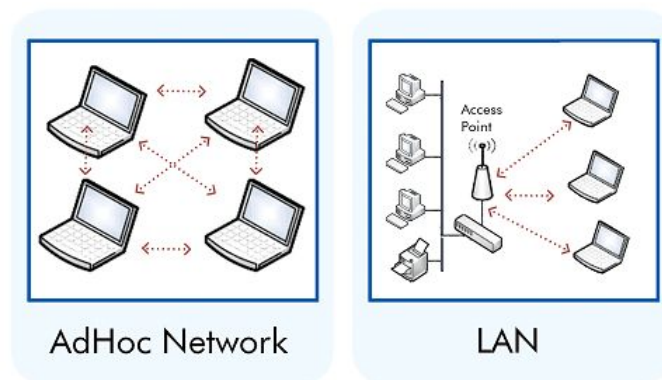


Figura 2.7 Rete Infrastructure (a sinistra) e rete Ad-hoc (a destra).

mentre le reti ad-hoc non richiedono dispositivi aggiuntivi e si auto-configurano automaticamente in tempi rapidi. Le antenne degli AP sono generalmente più potenti di quelle equipaggiate da laptop o smartphone, permettendo quindi di comunicare a range superiori. Le reti ad-hoc in generale impongono ai client un maggior consumo di risorse di sistema per far fronte alla mobilità dei nodi e al conseguente cambio della topologia, mentre nelle reti managed gli APs sono generalmente fissi. Questo fattore risulta critico se si considera che i tipici client delle reti ad-hoc sono dotati di batteria, e di conseguenza in questa tipologia di rete la loro autonomia sarà minore. Infine, le reti ad-hoc tendono a non scalare bene con il numero di client, a causa della maggior interferenza causata dalle numerose connessioni dirette tra client.

2.3 Reti FANET

Generalmente le reti ad-hoc vengono categorizzate in base alla tipologia dei client che le compongono. Le principali, schematizzate in Tabella 2.1, sono: MANETs (Mobile), VANETs (Vehicular), SPANs (Smartphone) e FANET (Flying).

Le reti FANET sono reti ad-hoc, ancora in fase sperimentale, tra droni equipaggiati con antenne radio, e possono essere viste come un sottoinsieme delle VANET (Figura 2.8), pur differendone sostanzialmente in termini di capacità, requisiti e problematiche. Tali reti possono essere impiegate sia per lo scambio di informazioni tra droni, per esempio per coordinarsi nel volo autonomo in “stormo”, sia come relay per mettere in comunicazione client a terra.

Attualmente le FANET impiegano soprattutto gli heavy UAVs, per sfruttarne la maggior potenza di calcolo e trasmissione, oltre che la maggior autonomia di volo,

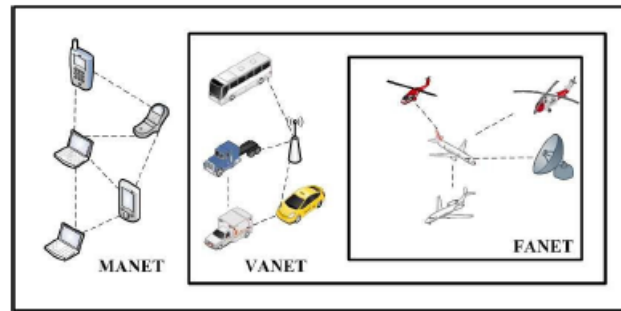


Figura 2.8 Tipologie di reti ad-hoc

ma grazie alla progressiva riduzione dei costi di produzione si sta sperimentando l'uso di molteplici Small UAVs.

Anche se il singolo SUAV ha capacità limitate, l'impiego di una squadra di droni porta i seguenti vantaggi:

- Aumenta la ridondanza, in quanto se un drone diventa offline i restanti possono riorganizzarsi e mantenere funzionante la rete, anche se a performance ridotte;
- Più droni possono parallelizzare il lavoro e ridurre i tempi della missione;
- Riduzione dei costi, impiegando più SUAVs economici rispetto un singolo e costoso HUAV;
- Aumenta la scalabilità, in quanto per coprire un'area di operazione maggiore basta aggiungere droni;
- Possono cooperare e sfruttare le reciproche funzionalità, utile soprattutto se equipaggiati in maniera differente gli uni dagli altri.

In una FANET si possono distinguere due modelli di comunicazione, che necessitano di protocolli differenti:

- Comunicazione drone-drone: la comunicazione può essere diretta o multi-hop, e generalmente riguarda il coordinamento di volo e la cooperazione nel compiere un dato task;
- Comunicazione drone-infrastruttura: la comunicazione avviene tra il drone e una ground station (o un satellite) e generalmente consiste nel fornire i dati rilevati dai sensori del drone.

Come già accennato, le reti FANET rappresentano ancora un nuovo campo per la ricerca, e prima che possano raggiungere il loro potenziale devono essere risolte ancora molte problematiche.

In base alla tipologia di drone impiegato ci si può aspettare differenti gradi di mobilità dei nodi, dal volo stazionario del piccolo quadri-rotore all'alta velocità degli HUAVs, e quindi una diversa frequenza di variazione della topologia. Gli stessi droni possono viaggiare a velocità diversa, guastarsi o allontanarsi per ricaricarsi, creando partizionamenti e continue riorganizzazioni della rete.

Il consumo energetico è un altro fattore chiave nelle FANET: mentre nelle MANET i devices hanno autonomie di svariate ore e nelle VANET i veicoli ricaricano la batteria grazie al movimento del mezzo, nelle FANET i piccoli droni possono restare in volo solo poche decine di minuti, perciò i protocolli di queste ultime devono minimizzare il consumo energetico, favorendo per esempio trasmissioni a bassa potenza e routing multihop. La presenza di molteplici droni aggiunge un'ulteriore complessità, in quanto occorrono protocolli di coordinazione, organizzazione e path-planning. Quest'ultimo consente ai droni di modificare il proprio percorso in reazione a cambiamenti dinamici, come la presenza di ostacoli.

Queste problematiche dimostrano che affinché le FANET possano essere impiegate efficacemente sono necessari nuovi protocolli di comunicazione, coordinamento e cooperazione tra droni.

Nonostante le somiglianze tra le tipologie di rete, i protocolli usati nelle reti MANET e VANET generalmente non sono utilizzabili nelle FANET o hanno scarse performance, perciò occorre definire nuovi algoritmi di routing dedicati e prevedere modifiche ai layers MAC e network [14].

2.3.1 Routing nelle FANET

Attualmente l'implementazione di algoritmi di routing per FANET ha seguito due strade: creazione di protocolli ad-hoc e modifiche di algoritmi preesistenti per MANET e VANET.

Si possono distinguere quattro tipologie di protocolli:

- Statici: le tabelle di routing vengono pre-calcolate e caricate sul drone, per poi non essere più modificate fino al termine della missione. Questa forte limitazione può essere tollerata solo nei casi in cui la topologia della rete rimane fissa nel tempo. Esempi di questa famiglia di protocolli sono LCAD (Load Carry and Deliver Routing) e il Multi-Level Hierarchical Routing;

	MANET	VANET	FANET
Tipo di nodo	Mobile devices (tablet, laptop, smartphone, etc.)	Veicoli	Droni
Descrizione	Dispositivi mobile in range tra loro si interconnettono in una rete ad-hoc, senza necessità di infrastrutture	Veicoli connessi tra di loro. La comunicazione avviene tra veicoli e tra veicoli e nodi di supporto (Roadside Units) disposti lungo la strada	I droni costruiscono una rete ad-hoc fra di loro e i nodi a terra
Mobilità	Lenta, generalmente al di sotto dei 2 m/s. Il pattern di movimento è tipicamente casuale	Alta velocità, in base alla tipologia di strada (urbana o autostradale). Il pattern di movimento è generalmente prevedibile in quanto vincolato dalla struttura della strada e dalle norme stradali.	Molto variabile, da stazionario a oltre i 100 m/s, a seconda della tipologia di drone. Il movimento può avvenire in due o tre dimensioni.
Topologia	Casuale, ad-hoc	A stella tra veicoli e infrastruttura stradale, ad-hoc tra i veicoli	A stella tra droni e ground control, ad-hoc o a mesh tra droni
Dinamicità	I nodi entrano ed escono dalla rete in maniera imprevedibile, frequenti partizionamenti	Maggior dinamicità rispetto la MANET, a causa della maggior velocità dei nodi e delle interferenze del traffico	Variabile, in base alla velocità relativa dei droni
Vincoli energetici	Nodi con batteria, autonomia di alcune ore	Batteria dei veicoli si ricarica con il movimento	Durata della batteria proporzionale alla dimensione dello UAV
Ambiti d'uso	Distribuzione dell'informazione, hotspot internet, networking	Informazioni di traffico, servizi location based, avvisi di emergenza	Sorveglianza, salvataggio, distribuzione, monitoraggio

Tabella 2.1 Confronto tra le diverse tipologie di reti ad-hoc

- Proattivi: sono gli algoritmi table-driven per le reti ad-hoc precedentemente descritti. Impiegati nelle FANET garantiscono velocità nel routing, ma la loro necessità di scambiare traffico di controllo aggrava la già ridotta disponibilità di bandwidth. Inoltre non sono adatti per reti di grandi dimensioni e in cui i nodi si muovono molto velocemente, poiché hanno tempi di reazione ai cambiamenti di topologia molto lunghi.
- Reattivi: precedentemente descritti come algoritmi on-demand, garantiscono un uso efficiente della banda in quanto non necessitano di traffico di controllo e scambi periodici di messaggi, ma introducono forti delay a causa della tipologia di traffico tipicamente intermittente delle FANET.
- Ibridi: cercano di unire i vantaggi dei protocolli proattivi e reattivi, riducendo la latenza iniziale e l'overhead dei messaggi di controllo, e sono efficaci anche in reti di grandi dimensioni.

Capitolo 3

Formulazione del problema I-DARNC

3.1 Scenario

Sono dati un numero n di utenti (client), distribuiti in una area geografica di dimensioni arbitrarie. Ciascun utente possiede un dispositivo portatile dotato di Wi-Fi (smartphone, tablet, etc.) e necessita di comunicare con uno o più degli utenti presenti nell'area, ma non può farlo direttamente per l'assenza dell'infrastruttura di rete, per l'eccessiva distanza che li separa o per non precisati motivi tecnologici.

Sono dati inoltre un numero d di Micro/Small UAVs capaci di volo stazionario (ad esempio, quadricotteri) ed equipaggiati con ricevitori e trasmettitori Wi-Fi. Questi droni possono essere posizionati in volo sopra gli utenti e, interconnettendosi tra loro, creare la backbone di una FANET per collegare tra loro gli utenti isolati, come illustrato in Figura 3.1. Il posizionamento di ciascun drone, espresso in coordinate spaziali, è determinato tramite la risoluzione di un modello di programmazione lineare intera mista (Mixed Integer Linear Problem, o MILP).

L'elaborazione del modello è compiuta da una Ground Station, in posizione fissa e sempre raggiungibile da almeno un drone, che si occupa di mantenere uno stato interno della rete di UAV (la loro posizione, lo stato, la banda disponibile, i flussi di traffico attivi, etc.), risolvere il modello MILP quando richiesto (periodicamente o quando si verifica un evento esterno che richiede un ricalcolo delle posizioni, come l'arrivo di nuovi utenti o un drone che diventa offline) e inviare l'aggiornamento delle coordinate ai droni interessati (per esempio mediante flooding).

Risolvere un'istanza del modello MILP significa minimizzare il costo di deployment dei droni, ovvero calcolare le posizioni del minor numero possibile di UAV

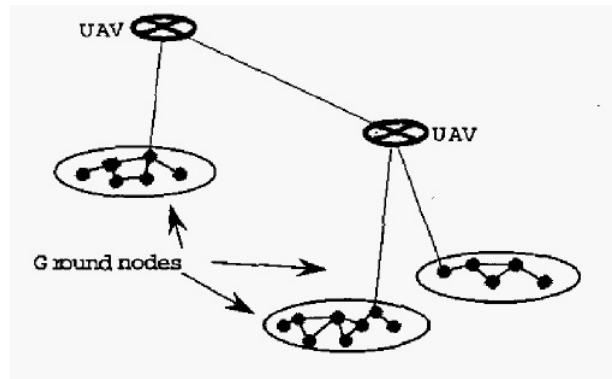


Figura 3.1 Backbone di UAVs per connettere gruppi isolati di utenti

necessario a costruire una rete ad-hoc capace di interconnettere ogni utente, e soddisfare le sue richieste di traffico, espresse da una matrice di traffico data.

3.2 Il grafo della rete

L'area geografica può essere rappresentata bi-dimensionalmente come una griglia rettangolare discreta formata da $L \times H$ punti.

Chiamiamo V l'insieme degli n utenti posizionati staticamente sulla griglia, e P l'insieme degli $L \times H$ punti facenti parte di essa. Definiamo inoltre l'insieme $V' = V \cup P$ come l'insieme dei punti e degli utenti.

Chiamiamo P l'insieme dei punti potenziali della rete, ovvero l'insieme di tutti quei punti della griglia in cui può essere posizionato un drone. Assumiamo che, per motivi di sicurezza, non si possa posizionare un UAV in un punto in cui è già presente un utente.

La rete ad-hoc che si viene a creare può essere modellata come un grafo diretto, dove i nodi rappresentano i membri della rete, quindi sia gli utenti che i droni impiegati, mentre gli archi indicano le connessioni wireless tra i nodi. Ad ogni arco può venire assegnato un peso che indichi un generico tipo di costo trasmissivo (energetico o legato ai parametri della rete). Si può vedere un semplice esempio in Figura 3.2, dove tre client (punti rossi) incapaci di comunicare direttamente (i cerchi rossi, rappresentanti il range di comunicazione, non si intersecano) vengono connessi tramite il posizionamento di un drone (punto blu).

Il modello risultante, che verrà introdotto nel capitolo 5, può essere descritto come l'ibridazione tra due tipici problemi di ottimizzazione, il Multi-Commodity Flow Problem [15] e il Capacitated Hub Location Problem con allocazione multipla

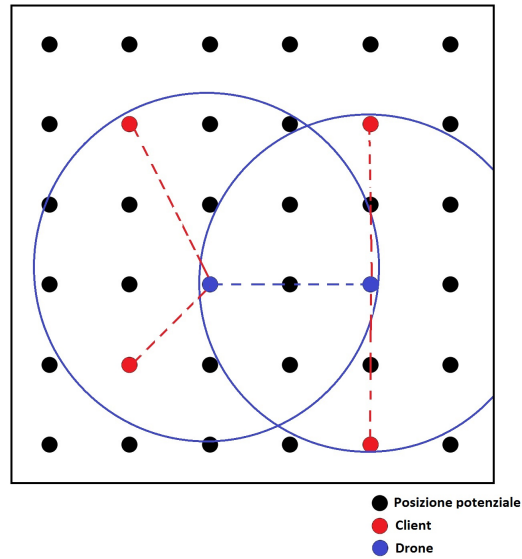


Figura 3.2 Backbone di UAVs per connettere gruppi isolati di utenti

[16].

La risoluzione del modello, infatti, può essere suddivisa logicamente in due passi sequenziali:

1. Individuare il numero minimo di droni necessari e la loro posizione ottimale sulla griglia;
2. Risolvere un problema di multi-commodity flow, dimensionando i flussi di traffico per ciascuna commodity, definite come coppie distinte di nodi sorgente-destinazione, per soddisfare le richieste di tutti i client.

Un'istanza tipica del problema viene descritta con:

- Insieme V degli n utenti, ciascuno con coordinate (x_i, y_i) , con $i = 0, 1, \dots, |V|$;
- Insieme K delle commodities, con $|K| = n(n-1)$;
- Numero massimo di droni disponibili (N_{UAV});
- Dimensione della griglia, in numero di punti;
- Costo di deployment di ciascun drone, se previsto (D_v);
- Matrice di traffico (T_{sd} , con $s, d \in V$);
- Matrice dei costi di trasmissione, se previsti (C_{ijk} , con $i, j \in V', k \in K$);

3.3 Assunzioni

L'intrinseca complessità del problema trattato e la necessità primaria di mantenere la linearità del modello hanno richiesto, durante la fase di modellizzazione, di introdurre una serie di assunzioni e semplificazioni al problema originario, che verranno ora brevemente trattate.

Come descritto nella sezione 3.2, modelleremo i droni, gli utenti e le loro posizioni come nodi fissi di un grafo posizionato all'interno di una griglia di punti. La staticità degli utenti è motivata dalla complessità di integrare, in maniera diretta, modelli che simulino il movimento casuale in un problema lineare [17, 18]. Si può però creare una simulazione offline di spostamento risolvendo iterativamente un'istanza con set di coordinate ogni volta diverse, ottenute applicando, in pre-elaborazione, modelli di movimento casuale agli utenti.

Nel modello non verranno introdotte le specifiche tecniche dei droni e non considereremo un modello realistico di volo: assumeremo solamente che tutti gli UAV siano tra loro identici, in fatto di performance e caratteristiche tecniche, e che siano in grado di muoversi autonomamente in linea retta da una posizione (x, y, z) ad un'altra, senza collidere con eventuali ostacoli lungo il cammino. Questa scelta consente di mantenere questi aspetti al di fuori del modello MILP, delegandoli ai droni stessi (per esempio con funzionalità di guida autonoma) o alla ground station.

Assumeremo inoltre che l'area geografica in cui si trovano gli utenti sia pianeggiante e priva di ostacoli naturali, come alberi, monti o depressioni, o artificiali, come edifici o altre barriere (open field), simulando così un ambiente con condizioni ottimali per la trasmissione e un ridotto numero di sorgenti di interferenza che devono essere gestite dal modello.

Riguardo gli utenti, assumiamo che il traffico da loro generato sia una piccola percentuale della capacità complessiva di un nodo, così da poter trascurare gli effetti dell'interferenza da loro causata sui droni.

Come evidenziato nella sezione 2.1.5, attualmente uno dei principali limiti dei droni è dato dalla esigua autonomia di volo. In questo modello assumeremo che i droni siano energeticamente autosufficienti, tramite l'uso di pannelli solari ad alta efficienza [19] o impiegando un sistema automatizzato di stazioni di ricarica [20], così da poter fornire un servizio continuo e persistente. Questa scelta rende impossibile il verificarsi di link failures, e il conseguente cambio di topologia, ma può essere simulato risolvendo nuovamente un'istanza con un numero ridotto di droni o vietandone il deployment in certi punti potenziali (no-flight zones).

Dal punto di vista della rete, non considereremo alcun parametro di Quality of

Service (QoS) [21] e, per mantenere semplice la modellizzazione del grafo, assumeremo che i nodi possano comunicare in modalità full-duplex [22], in modo che sia l'arco diretto che quello inverso possano esistere contemporaneamente.

Assumeremo inoltre che l'overhead causato dal traffico di controllo, come l'ACK signaling del protocollo TCP, i messaggi di routing o il flooding per diffondere informazioni tra i droni, sia di dimensione trascurabile. Consideriamo inoltre che tutti i devices Wi-Fi montati sui droni e posseduti dagli utenti siano identici in termini di bandwidth, potenza trasmessa (la massima permessa) e range massimo di trasmissione/ricezione (TX/RX) e che siano equipaggiati con antenne ideali isotropiche [23] che non subiscono interferenza elettromagnetica dagli apparati del drone.

Infine, per evitare l'introduzione di un secondo problema di ottimizzazione relativo all'assegnazione delle frequenze, assumiamo che tutti i nodi della rete condividano lo stesso canale wireless. Come conseguenza di ciò la trasmissione di ogni nodo causerà interferenza co-channel [24] a tutte le altre trasmittenti entro il suo range, con intensità dipendente dalle distanze reciproche.

Capitolo 4

Stato dell'arte e strumenti

4.1 Stato dell'arte

La possibilità di impiegare i droni come relays in una FANET li rende una possibile soluzione in situazioni dove gruppi di nodi a terra rimangono isolati dal resto della rete.

L'integrazione di dispositivi wireless in micro/small UAVs è frutto di studi recenti. In [25] gli autori hanno dimostrato la possibilità di poter creare un nodo ad-hoc volante utilizzando hardware a basso costo e off-the-shelf basato sul protocollo IEEE 802.11b. Altri studi si sono concentrati sul valutare le performance di queste reti FANET sperimentali, come in [26], in cui è stata costruita una rete testbed wireless 802.11b dove un drone mette in comunicazione nodi isolati a terra, e si misurano performance come throughput, delay, range e connettività, e in [27], dove si è ripetuto un simile esperimento, su rete 802.11a, ma valutando il throughput in funzione di diversi orientamenti delle antenne e diverse distanze di comunicazione, giungendo quindi alla conclusione che le migliori performance si ottengono con antenne omni-direzionali.

In letteratura sono stati proposti vari algoritmi e tecniche per risolvere il posizionamento ottimo di droni in una rete ad-hoc.

In [6, 28] gli autori descrivono il problema da un punto di vista del networking, affermando che una delle principali key enabling technologies per lo sviluppo futuro delle FANET sia la progettazione di nuovi protocolli di rete e l'adattamento di quelli attuali, dato che le FANET introducono nuove sfide e requisiti.

In [29] e [30] gli autori propongono un modello MILP centralizzato per coordinare il volo di un gruppo di droni e evitare le collisioni con eventuali ostacoli.

In [31], il problema di posizionare i droni in una rete hub-and-spoke per interconnettere un insieme di client viene formulato come problema MILP, e viene fornito

un approccio di Quadratic Integer Programming per determinare la topologia a minimo costo della rete. Gli autori concludono affermando che, seppure un approccio quadratico riduca notevolmente il numero di vincoli e abbia performance migliori, rispetto la controparte lineare, la ricerca di un modello lineare, qualora possibile, sarebbe sempre da preferire grazie alle tecniche di risoluzione di alta qualità disponibili.

In [32] il modello proposto si focalizza sull'impiego un drone per migliorare la connettività della rete ad-hoc sottostante, ottimizzando i flussi di traffico con un modello multi-commodity flow, ma considera la presenza di un singolo drone e assume che gli utenti sottostanti siano già tra loro interconnessi, oltre a non considerare il problema dell'interferenza.

Per la risoluzione di questo problema sono stati proposti anche approcci distribuiti, come in [33], dove le decisioni sul posizionamento e lo spostamento sono delegate ai droni, che sono in grado di apprendere informazioni sullo stato della rete e sulle loro posizioni reciproche e agire di conseguenza, e in [34], in cui gli UAV usano sensori (come il GPS) o parametri di rete (come il Received Signal Strength Indicator, o RSSI) per posizionarsi nello spazio e ottimizzare la comunicazione con i nodi a terra.

Un altro approccio ampiamente usato è quello delle meta-euristiche: in [35] vengono proposti e confrontati due algoritmi, basati su Hill Climbing e Tabu Search, che valutano le posizioni migliori in cui disporre dei nodi di supporto che permettano di riconnettere sezioni della rete originale rimasti isolati, in [36] gli autori realizzano un algoritmo dinamico per minimizzare il numero di droni, prendendo in considerazione il problema del movimento casuale dei client e dei protocolli di routing necessari ma senza analizzare il problema dell'interferenza, mentre in [37] si impiega un algoritmo genetico per posizionare i nodi relay in modo da massimizzare il throughput della rete e consentire il self-healing dei link che diventano offline.

Per quanto riguarda la gestione dell'interferenza, è generalmente molto complesso predirli in maniera statica, a causa della dinamicità dell'ambiente in cui la rete si trova e dei fattori che concorrono a causarla. Di conseguenza, generalmente si cerca di valutarla in tempo reale monitorando determinati parametri di qualità della rete [38, 39] e di prevenirla attraverso opportune scelte di design in fase di progettazione, per esempio tramite channel allocation [40].

Tradizionalmente, l'interferenza è stata implicitamente minimizzata agendo sulla topologia del grafo della rete, riducendone la densità o il grado dei nodi, ottenendo range di comunicazione più corti e, quindi, interferenza più bassa. In [41], invece, tali tecniche vengono confutate, asserendo che rendere un grafo sparso non riduce

automaticamente l'interferenza subita dai nodi, e vengono fornite nuove tecniche costruttive per minimizzarla.

4.2 Interferenza radio

Nelle comunicazioni wireless la minimizzazione dell'interferenza è un problema primario, dato che al suo crescere aumenta il rischio di collisione tra pacchetti e la conseguente necessità di ritrasmissione, riducendo le performance globali della rete.

Poiché nelle reti wireless il mezzo trasmissivo non è un canale fisico, abbiamo dovuto traslare il concetto di capacità massima dal punto di vista del canale a quello del nodo. Questo significa che ogni nodo è caratterizzato da una capacità trasmissiva massima ottimale U_{TX} e da una capacità di ricezione massima ottimale U_{RX} . Questi due valori rappresentano il numero massimo di pacchetti (visti come parte di un flusso) che un nodo può inviare o ricevere in un dato istante di tempo in un ambiente privo di interferenza.

Il modello di interferenza che descriveremo è basato sul punto di vista del ricevente [42], cioè ogni nodo subisce interferenza da qualunque nodo stia trasmettendo all'interno del suo range. Considereremo l'interferenza dal punto di vista del physical layer.

L'obiettivo principale nella modellizzazione dell'interferenza è stato quello di mantenerla al di fuori del modello MILP, cosicché fosse possibile applicare un qualunque modello, di complessità arbitraria, senza preoccuparsi dei vincoli di linearità. Abbiamo perciò definito un modello statico e locale di interferenza basato sulla distribuzione spaziale dei nodi e sul loro range trasmissivo. Tale modello calcola la riduzione di capacità dei nodi e la fornisce in output sotto forma di fattore di sconto, che può essere impiegato come coefficiente nel modello MILP, mantenendo la linearità del modello.

4.2.1 Modello di interferenza

Dato che l'interferenza radio dipende da una pluralità di fattori, generalmente molto difficili da determinare a priori e senza dati sperimentali, abbiamo dovuto imporre una forte semplificazione al modello, ovvero che l'interferenza venga valutata tra ogni coppia di nodi mittente-destinatario assumendo che nessun'altra trasmissione stia avvenendo entro il loro range. Questo comporta la riduzione delle sorgenti di interferenza alle sole caratteristiche dell'ambiente e al path loss

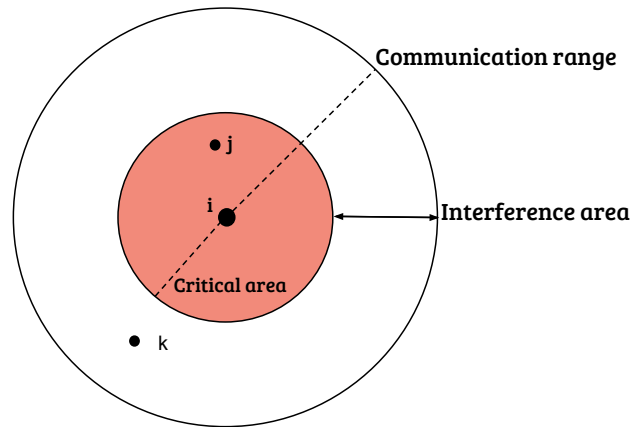


Figura 4.1 Schema del range di comunicazione di un nodo

[43] (ovvero l'attenuazione di un segnale elettromagnetico conseguente alla sua propagazione nello spazio e a effetti di rifrazione, riflessione, diffrazione o assorbimento), che possono essere determinati staticamente tramite approssimazioni e modelli empirici.

L'interferenza totale che un nodo subisce sarà quindi proporzionale al numero di nodi che trasmettono all'interno del suo range di comunicazione [44, 45], e verrà scontata dalla capacità ottimale di ricezione U_{RX} .

Nel caso di elevato livello di interferenza (ad esempio se due droni sono molto vicini tra loro), limitato superiormente al valore S_{max} , assumiamo che una minima frazione della capacità U_{RX} sia sempre garantita. Questo livello minimo di capacità, per ogni nodo, è un parametro del modello e corrisponde all'efficienza minima dei protocolli di reti wireless classici [46].

Ogni nodo è caratterizzato da un'area di trasmissione circolare con raggio R , al cui interno gli altri nodi possono riceverne i dati inviati. Questa area trasmissiva coincide con l'area totale di interferenza [47], perciò se la distanza tra due nodi i e j è maggiore di R , le trasmissioni di i non interferiranno con j e viceversa.

Definiamo con A_{ij} il coefficiente di interferenza, inteso come riduzione di capacità, che il nodo j subisce a causa della vicinanza del nodo i . Si noti che, in questo modello, $A_{ij} = A_{ji}$. In base alla distanza reciproca fra due nodi, il fattore di interferenza viene valutato in due modi differenti.

Per ciascun nodo, definiamo una seconda area circolare di raggio R_ϵ ($R_\epsilon \ll R$), detta Area Critica, al cui interno l'interferenza causata da un eventuale nodo è massima, e la corona circolare identificata dalla differenza delle aree trasmissiva e critica, come si può vedere in Figura 4.1.

L'area critica è la zona in cui ogni nodo è più sensibile all'interferenza. Per

questo motivo, dati due nodi i e j e la funzione $d(x, y)$ che ne calcola la distanza geometrica, se $d(i, j) < R_e$ i due nodi si interferiranno a vicenda in maniera massima, quindi $A_{ij} = S_{max}$. La presenza di molteplici nodi in questa zona non annullerà comunque la capacità minima garantita.

Se invece i nodi più vicini ad i si trovano nella corona circolare, allora l'interferenza totale subita da i può essere valutata simulando un Radio Propagation Model, e sarà proporzionale al numero di questi nodi e alla loro distanza da i , pur senza superare il livello massimo di interferenza S_{max} consentito dal modello.

4.2.2 ns-2 Radio Propagation Model

I coefficienti dell'area di interferenza A_{ij} vengono valutati staticamente utilizzando un Radio Propagation Model [48], ovvero un modello matematico empirico che descrive e formalizza la propagazione delle onde radio in funzione della frequenza, della distanza, dell'ambiente circostante e di altri parametri.

Lo scopo principale di questi modelli è determinare l'attenuazione che il segnale radio (path loss) subisce nel tragitto fra la trasmittente e il ricevente, in quanto essa è il fattore principale che permette di caratterizzare come l'onda si propaga. Lo scopo secondario è quello di stimare l'area di comunicazione di una trasmittente. Poiché ogni link wireless è soggetto a differenti fenomeni di interferenza (ostacoli, condizioni ambientali, terreni), è chiaramente impossibile modellare e prevedere in maniera esatta il path loss per ciascun sistema. Di conseguenza sono nati numerosi modelli, ciascuno specializzato per determinate condizioni e ambienti. I radio propagation models sono totalmente empirici, perché sviluppati su ampi campioni di dati raccolti in specifici scenari, quindi non sono in grado di predire il path loss esatto, ma il suo comportamento generale in quel determinato set di condizioni.

Il modello che abbiamo deciso di impiegare è lo Shadowing Model implementato dal simulatore di rete ns-2 [49], in quanto rappresenta un buon compromesso tra accuratezza, generalità e semplicità di implementazione.

Nello shadowing model il range di comunicazione di ogni nodo è più realistico, in quanto non è un cerchio ideale, ma presenta frastagliature e irregolarità crescenti man mano che ci si allontana dal centro (Figura 4.2), per simulare gli effetti del multipath propagation.

Tale fenomeno, presente in ogni comunicazione radio, è causato dalla propagazione in più direzioni di un segnale trasmesso da un'antenna: ciascuna copia del segnale compie percorsi diversi e incontra diversi ostacoli e superfici (acqua, terreno, edifici, montagne, veicoli, etc.), subendo distorsioni prima di sommarsi

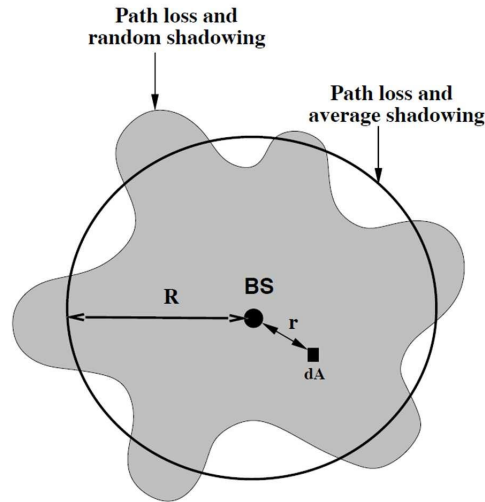


Figura 4.2 Range di comunicazione nello Shadowing Model

al segnale originale, introducendo interferenze [50].

Lo shadowing model è costituito da due parti. La prima parte calcola il path loss (P_L), e tramite formula inversa fornisce la stima della potenza del segnale ricevuto da una distanza d dal trasmettitore ($\overline{P_r(d)}$). Il path loss viene determinato in funzione della potenza P_r a una distanza di riferimento d_0 ($P_r(d_0)$), che generalmente vale 1-10m per ambienti interni e 10-100m per esterni, e dell'esponente di path loss β , generalmente determinato empiricamente con misurazioni sul campo. La formula risultante è la seguente:

$$P_L(d) = \frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} = \left(\frac{d}{d_0} \right)^\beta$$

Valori tipici di β sono riportati nella seguente Tabella 4.1. A valori crescenti di β corrispondono ambienti con maggior presenza di ostacoli, che causano una maggiore attenuazione del segnale al crescere della distanza.

Ambienti esterni	Free space	2
	Area urbana	2.7 - 5
Ambienti interni	Linea di visuale libera	1.6 - 1.8
	Linea di visuale ostruita	4 - 6

Tabella 4.1 Valori empirici per β

La potenza di riferimento $P_r(d_0)$ viene calcolata con il Free space Model [51],

considerando cioè che trasmettitore e ricevitore si trovino a distanza d_0 in linea di visuale e con condizioni ideali di propagazione dei segnali:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}$$

Dove P_t è la potenza trasmessa, G_t e G_r i parametri di gain delle antenne trasmettente e ricevente, L è il system loss e λ è la lunghezza d'onda. Generalmente $L = 1$ e, per antenne ideali, $G_t = 1$ e $G_r = 1$.

La seconda parte dello shadowing model modella la variabilità del range di comunicazione di un nodo, causato dal multipath propagation, tramite una variabile casuale X_{dB} log-normale (ovvero il cui logaritmo segue una distribuzione normale):

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(\log(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}$$

La variabile log-normale X_{dB} ha media $\mu = 0$ e deviazione standard σ , detta shadowing deviation ed espressa in deciBel (dB), misurata empiricamente. Valori tipici di σ sono 4-12 per ambienti esterni e 3-9 per ambienti interni con diverse concentrazioni di ostacoli.

Il modello di shadowing completo, espresso in dB, è quindi il seguente:

$$P_L(d)_{dB} = -10 \beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{dB}$$

La scelta di questo modello ha come conseguenza che vi è una probabilità non nulla che i messaggi trasmessi entro il range del destinatario non vengano ricevuti. Questa probabilità cresce al crescere della distanza dal nodo ricevente.

Vale la pena far notare che la forma più realistica del range di comunicazione non interferisce con le precedenti assunzioni di un'area trasmissiva circolare perfetta, impiegata all'interno del modello MILP.

Nel modello di interferenza di ns-2, ogni nodo ha un parametro $rxThresh$ che rappresenta la soglia di ricezione del segnale: quando un pacchetto viene ricevuto, se ne testa la potenza di segnale (P_r) con $rxThresh$, e se $P_r \geq rxThresh$ il pacchetto viene considerato ricevuto correttamente.

Per semplificare il calcolo, assumeremo che la variazione della potenza di segnale tra pacchetti dello stesso flusso, valutata dal modello, sia trascurabile.

Successivamente, il valore P_r calcolato dal modello di interferenza deve essere tradotto in una percentuale di riduzione della capacità, per poter essere impiegato nel MILP. Questa procedura viene eseguita come pre-elaborazione nel seguente modo:

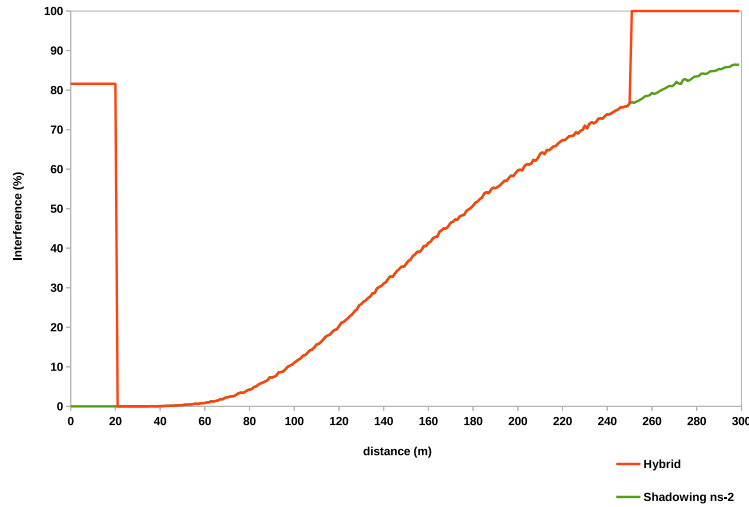


Figura 4.3 Confronto tra il modello di shadowing ns-2 e quello adottato

1. Si calcola P_r per ogni coppia (i,j) di nodi trasmittente-ricevente un numero significativamente alto di volte, per ottenere la frequenza relativa $f_{flow}^{i,j}$ con cui P_r supera il valore $rxThresh$. Questo valore rappresenta una stima della probabilità che il flusso di traffico trasmesso sia interamente ricevuto con successo;
2. Si mappa il valore $f_{flow}^{i,j}$ ottenuto su una scala percentuale di interferenza che va da 0 (nessuna interferenza) a S_{max} (massima interferenza ammessa dal modello);
3. Il valore risultante costituisce il coefficiente A_{ij} e può essere impiegato nel modello MILP come valore percentuale di riduzione della capacità totale del nodo i a causa della presenza del nodo j .

In Figura 4.3 si può vedere il confronto tra lo shadowing model di ns-2 da quello da noi adottato. Si simula l'allontanamento progressivo di un nodo trasmittente dal ricevente e si stima la riduzione di capacità percentuale utilizzando i due modelli.

In questo particolare esempio l'area critica ha range $R_c = 20m$ e range di comunicazione $R = 250m$. Entro il range R_c l'interferenza sarà pari al valore di soglia S_{max} , mentre oltre il range trasmissivo massimo la comunicazione non può avvenire, quindi verrà simbolicamente considerata pari al 100%.

Capitolo 5

Un modello di programmazione lineare intera mista per I-DARNC

In questo capitolo presenteremo il modello di programmazione lineare intera I-DARNC (Interference-aware Drone Ad-hoc Relay Network Configuration problem) per il posizionamento minimo e ottimale di un gruppo di droni per mettere in comunicazione gruppi di utenti isolati tra loro, soddisfacendo le loro richieste di traffico. Verranno poi presentate le formulazioni alternative più rilevanti incontrate durante il suo sviluppo.

5.1 Formulazione del modello

Il modello presentato in Figura 5.1 si basa sulla formulazione del problema multi-commodity flow, dove le variabili f_{ij}^{sd} rappresentano la quantità di banda che deve essere riservata sul link tra i nodi i e j per il traffico relativo alla commodity k (che rappresenta univocamente la coppia sorgente-destinazione $s-d$).

Il routing del traffico richiesto è garantito dal vincolo di bilanciamento (5.1), dove $B_v^{sd} = -T^{sd}$ se $v = s$ (cioè se v è un nodo sorgente e quindi genera traffico uscente); T^{sd} , se $v = d$ (cioè se v è un nodo destinatario e riceve traffico), e 0 altrimenti (v è un nodo intermediario, cioè un drone, che si limita a ricevere e re-instradare il traffico).

Per ogni posizione potenziale $i \in P$ viene definita una variabile y_i , che assumerà valore 1 se un drone viene posizionato in i , 0 in caso contrario. I vincoli (5.2) e (5.3) rappresentano il flusso massimo che può essere rispettivamente trasmesso e ricevuto da una posizione in cui è presente un drone, considerando il fattore di interferenza. In particolare, nel vincolo (5.2) il parametro A_{ij} tiene in considerazio-

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{v \in P} y_v \\ \text{s.t.} \quad & \end{aligned}$$

$$\sum_{i \in V \cup P: d_{iv} \leq R} f_{iv}^{sd} - \sum_{j \in V \cup P: d_{vj} \leq R} f_{vj}^{sd} = B_v^{sd} \quad \forall v \in V \cup P, (s, d) \in K \quad (5.1)$$

$$\sum_{j \in V \cup P} \sum_{(s, d) \in K} f_{ij}^{sd} (1 + A_{ij}) \leq U^{TX} y_i \quad \forall i \in P \quad (5.2)$$

$$\sum_{j \in V \cup P} \sum_{(s, d) \in K} f_{ji}^{sd} \leq U^{RX} (y_i - s_i) \quad \forall i \in P \quad (5.3)$$

$$z_i \geq y_j \quad \forall i, j \in P, i \neq j: d_{ij} \leq R_\varepsilon \quad (5.4)$$

$$\sum_{j \in P: R_\varepsilon < d(i, j) \leq R} A_{ji} y_j + \sum_{j \in V: d(i, j) \leq R} A_{ji} \leq S_{\max} + (M_i - S_{\max}) o_i \quad \forall i \in P \quad (5.5)$$

$$s_i \geq S_{\max} (z_i + y_i - 1) \quad \forall i \in P \quad (5.6)$$

$$s_i \geq S_{\max} (o_i + y_i - 1) \quad \forall i \in P \quad (5.7)$$

$$s_i \geq \sum_{j \in P: R_\varepsilon < d(i, j) \leq R} A_{ji} y_j + \sum_{j \in V: d(i, j) \leq R} A_{ji} - M_i (1 - y_i + z_i + o_i) \quad \forall i \in P \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} y_i &\in \{0, 1\} & \forall i \in P \\ f_{ij}^{sd} &\geq 0 & \forall i, j \in V \cup P, \forall (s, d) \in K, i \neq j \\ z_i &\in \{0, 1\} & \forall i \in P \\ s_i &\geq 0 & \forall i \in P \\ o_i &\in \{0, 1\} & \forall i \in P \end{aligned} \quad (5.9)$$

Figura 5.1 Il modello MILP I-DARNC.

ne la necessità di ritrasmissione di una frazione dei dati a causa dell'interferenza. La quantità di dati ritrasmessi sarà proporzionale all'interferenza stessa. In (5.3), invece, la capacità di ricezione subisce una riduzione proporzionale al fattore di sconto s_i .

Se nessun drone viene posizionato nel punto i , allora non ci può essere scambio di dati tra i punti i e j , quindi il vincolo (5.2) imporrà che la somma di tutte le variabili f_{ij}^{sd} coinvolte sia minore o uguale a 0, e per la definizione di f_{ij}^{sd} (5.9) verranno poste a 0. Discorso analogo viene fatto per il vincolo (5.3) e le variabili f_{ji}^{sd} .

La perdita di capacità di un nodo ricevente posizionato in i viene rappresentata dalla variabile s_i , il cui valore è determinato dai vincoli (5.4-5.7), nella maniera precedentemente descritta dal modello di interferenza adottato.

Ad ogni posizione $i \in P$ sono associate altre due variabili binarie z_i e o_i : la variabile z_i (5.4) assume valore 1 se all'interno dell'area critica del nodo i viene posizionato almeno un drone (causando l'assegnazione $s_i = S_{max}$), mentre o_i assume valore 1 (5.5) se l'interferenza totale causata da tutti i nodi j posizionati a distanza $R_\epsilon < d(i, j) \leq R$ supera il valore massimo S_{max} , 0 altrimenti.

Le variabili z_i ricevono assegnamento nel vincolo (5.4): per ogni coppia i, j reciprocamente interni alle proprie aree critiche, se in j è posizionato un drone, allora i subirà interferenza massima ($z_i = S_{max}$), e se $z_i = 0$, poichè $d(i, j) \leq R_\epsilon$, allora non sarà ammesso un drone in posizione j ($y_j = 0$).

Il vincolo (5.5) determina l'assegnamento delle variabili o_i tramite il calcolo del fattore di interferenza complessivo subito dal nodo i da parte di tutti i nodi j interni all'area di interferenza. Se l'interferenza totale supera il valore ammesso massimo S_{max} , allora il vincolo impone $o_i = 1$ e diventa ridondante. La costante big-M (M_i) del vincolo viene dimensionata ponendola uguale al valore del membro sinistro considerando tutte le variabili y_i coinvolte poste a 1.

Il valore della variabile s_i viene determinato nei vincoli (5.4-5.7) nel seguente modo: se $y_i = 0$ i vincoli detti diventano ridondanti (si avrà $s_i \geq -S_{max}$ oppure $s_i \geq 0$), e s_i potrà assumere valore 0; se $z_i = 1$ o $o_i = 1$, allora s_i viene posto al valore S_{max} rispettivamente dal vincolo (5.6) o da (5.7), attivando il big-M del vincolo (5.8) e rendendolo di conseguenza ridondante; se invece $z_i = 0$ e $o_i = 0$ i vincoli (5.6) e (5.7) diventano ridondanti ($s_i \geq -S_{max}$ o $s_i \geq 0$), e il lower bound della riduzione di capacità nella posizione i (minore di S_{max} poichè $o_i = 1$) viene determinato da (5.8).

5.2 Formulazioni alternative

Oltre al modello principale, su cui sono stati compiuti gli studi e i test che verranno trattati nel Capitolo 6, sono stati sviluppati alcuni modelli alternativi per risolvere variazioni del problema originale.

Gli aspetti che tali modelli riguardano sono:

- Costi di trasmissione;
- Limite sul numero di droni disponibili;
- Limite sul numero di connessioni simultanee;
- Interferenza tra client e droni.

5.2.1 Costi di trasmissione

In questa versione si introduce un costo noto c_{ij}^{sd} per la trasmissione di una unità di flusso (per esempio, un pacchetto dati) attraverso il link (i, j) relativo alla commodity (s, d) .

Tale costo può essere motivato sia da un punto di vista della rete, per esempio per riflettere lo stato dei nodi o certi parametri di rete, o per sfavorire il transito dei dati su certi link, sia da un punto di vista energetico, in cui il costo di un pacchetto corrisponde al consumo energetico necessario per spedirlo.

Questa versione è stata implementata sostituendo la funzione obiettivo del modello I-DARC con la seguente:

$$\min \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} \sum_{(s,d) \in K} c_{ij}^{sd} f_{ij}^{sd} + \sum_{v \in P} y_v$$

Nella nuova funzione obiettivo ogni variabile di flusso f_{ij}^{sd} ha associato il corrispondente costo di trasmissione c_{ij}^{sd} , e la minimizzazione riguarderà non solo il numero di droni impiegati, ma anche trovare la configurazione di flussi con costo minimo.

5.2.2 Limite sul numero di droni disponibili

Questa formulazione può essere considerata più realistica di I-DARC, perché pone un vincolo sul massimo numero di droni che possono essere impiegati (N_{UAV}), invece di assumere di averne a disposizione una quantità pari al numero di posizioni potenziali ($|P|$).

Aggiungendo questo vincolo si toglie un grado di libertà al modello, e di conseguenza sarà in grado di risolvere solo un sottoinsieme delle istanze risolvibili da I-DARC.

Per ottenere questa versione occorre aggiungere il seguente vincolo, che impone un limite superiore al numero di variabili y_i cui assegnare il valore 1:

$$\sum_{i \in P} y_i \leq N_{UAV}$$

5.2.3 Limite sul numero di connessioni simultanee

In questa versione si pone invece un limite superiore e/o inferiore al numero di connessioni che ogni nodo può sostenere in contemporanea.

Imporre un numero massimo può essere utile per bilanciare i flussi della rete, evitando che tutto il traffico si concentri su pochi link, mentre imponendone un limite inferiore si realizza una semplificazione del concetto di robustezza della rete.

In questa variante è però necessario introdurre le variabili binarie x_{ij} , con $i, j \in V'$, dove $x_{ij} = 1$ se si è stabilito un link tra i nodi i e j , appesantendo il modello con la necessità di vincoli aggiuntivi per il loro controllo.

Il numero massimo (L_{max}) e minimo (L_{min}) di connessioni vengono imposti, rispettivamente, dai seguenti vincoli:

$$\sum_{i \in P} x_{ij} \leq L_{max} \quad \forall j \in V'$$

$$\sum_{i \in P} x_{ij} \geq L_{min} \quad \forall j \in V'$$

5.2.4 Interferenza tra client e droni

In questa formulazione viene ampliato il modello di interferenza, affermando che anche i client, con le loro trasmissioni, possono causare interferenza ai droni, e vice-versa.

Di conseguenza sarà necessario considerare le variabili s_i , o_i , z_i anche per ogni

utente, quindi $\forall i \in V \cup P$:

$$\begin{aligned} y_i &\in \{0, 1\} & \forall i \in P \\ f_{ij}^{sd} &\geq 0 & \forall i, j \in V \cup P, \forall (s, d) \in K, i \neq j \\ z_i &\in \{0, 1\} & \forall i \in V \cup P \\ s_i &\geq 0 & \forall i \in V \cup P \\ o_i &\in \{0, 1\} & \forall i \in V \cup P \end{aligned}$$

I vincoli da integrare alla formulazione base sono:

$$\begin{aligned} \sum_{j \in P} \sum_{(s, d) \in K} f_{ij}^{sd} (1 + A_{ij}) &\leq U^{TX} & \forall i \in V \\ \sum_{j \in P} \sum_{(s, d) \in K} f_{ji}^{sd} &\leq U^{RX} - s_i & \forall i \in V \end{aligned}$$

Questi vincoli, analoghi per funzionalità ai vincoli (5.2) e (5.3) del modello base, definiscono la quantità di flusso massima che può essere trasmessa e ricevuta da una posizione in cui è presente un utente, considerando il fattore di interferenza. A differenza dei corrispondenti vincoli del modello base, non sono presenti riferimenti alle variabili y_i , in quanto le posizioni i si riferiscono appunto ad utenti, non a posizioni potenziali (si può pensare a questo fatto come se ad ogni utente fosse assegnata una variabile y_i sempre posta a 1). Il termine A_{ij} in (5.2) tiene in considerazione la necessità di ritrasmissione di una frazione dei dati a causa dell'interferenza, e tale quantità sarà proporzionale all'interferenza stessa. In (5.3), invece, la capacità di ricezione subisce una riduzione pari al fattore di sconto s_i .

$$\sum_{\substack{j \in P: \\ R_e < d(i, j) \leq R}} A_{ji} y_j \leq S_{\max} + (M_i - S_{\max}) o_i \quad \forall i \in V$$

Il vincolo corrisponde al (5.5) della formulazione principale, e determina il valore delle variabili o_i . La sommatoria calcola l'interferenza che ogni nodo utente subisce dai droni posizionati entro il suo range R . La seconda sommatoria, presente in (5.5) e relativa ai client, è qui assente in quanto per ipotesi iniziali gli utenti non possono comunicare tra loro, e di conseguenza non possono nemmeno causarsi interferenza reciproca.

$$\begin{aligned} s_i &\geq S_{\max} z_i & \forall i \in V \\ s_i &\geq S_{\max} o_i & \forall i \in V \end{aligned}$$

Questi vincoli, come i corrispondenti (5.6 - 5.7), determinano l'assegnamento delle variabili s_i con $i \in V \cup P$. Venendo a mancare la presenza della variabile y_i , il vincolo risulta semplificato, in quanto l'assegnamento di s_i dipenderà solo, rispettivamente, da z_i e o_i .

$$s_i \geq \sum_{\substack{j \in P: \\ R_e < d(i,j) \leq R}} A_{ji} y_j - M_i (z_i + o_i) \quad \forall i \in V$$

In questo vincolo, analogo a (5.8), si definisce il lower bound di s_i , con $i \in V \cup P$. Se il big-M viene attivato dalle variabili z_i o o_i (cioè c'è almeno un drone nel range critico di i o l'interferenza totale supera il valore S_{max}), allora il vincolo diventa ridondante, altrimenti s_i assumerà valore minimo pari all'interferenza totale causata da tutti i droni presenti nell'area di interferenza. Il contributo di interferenza dato dagli utenti non è presente in quanto, per ipotesi iniziale, gli utenti non comunicano e non interferiscono tra di loro.

Capitolo 6

Metodi di soluzione

6.1 Metodi esatti

Lo sviluppo di un modello ad-hoc per il nostro problema ha implicato l'impossibilità di testarlo contro i vari data set disponibili in letteratura, in quanto nessuno di quelli esaminati si è rivelato compatibile con le nostre necessità.

Di conseguenza abbiamo creato il nostro personale data set tramite la generazione casuale di istanze, per testare le capacità, le performance e i limiti del modello. Le istanze prodotte differiscono per dimensione della griglia, matrice di traffico, numero dei client e loro posizione nella griglia. I risultati verranno presentati nel Capitolo 7.

Il modello è stato implementato in C++ utilizzando le CPLEX Callable Library (C API), e risolto con IBM ILOG CPLEX Optimization Studio v12.6.0, configurato nel seguente modo:

- **Deterministic parallel optimization:** tale modalità significa che esecuzioni multiple dello stesso modello, con gli stessi parametri e sulla stessa piattaforma, seguiranno sempre lo stesso path che porta alla soluzione. La modalità alternativa opportunistic, invece, pone meno vincoli sulla sincronizzazione dei threads, quindi anche piccole differenze della loro temporizzazione o nell'ordine di esecuzione dei tasks possono portare a diversi percorsi risolutivi e, di conseguenza, a tempi di esecuzione anche molto diversi;
- **Memory emphasis e node storage:** si chiede a CPLEX di adottare politiche di risparmio della memoria e di comprimere porzioni dell'albero per evitare il più possibile il degrado delle prestazioni causato dall'uso dello swapping;

- Tree memory growth limit: si pone un limite assoluto alla dimensione massima che può assumere l'albero di branch & cut durante la ricerca della soluzione, al di sopra del quale l'esecuzione viene terminata;
- Instance time limit: limite massimo di 40 minuti per la soluzione di un'istanza. L'uso del parallelismo deterministico a fronte di un time limit non pone problemi di riproducibilità [52] .

Il focus sulla conservazione della memoria si è reso necessario per poter gestire, in maniera controllata, la terminazione forzata dell'esecuzione di istanze medio-grandi a causa dell'esagerato consumo di memoria da parte di CPLEX.

I primi test hanno dimostrato che solo piccole istanze possono essere risolte nell'ordine di grandezza dei secondi o dei minuti, mentre le istanze medio-grandi hanno richiesto ore o giorni, e la maggioranza di esse non si è potuta risolvere a causa di limiti sulla memoria disponibile.

Per poter risolvere istanze di dimensione crescente si è perciò resa necessaria l'adozione di un approccio euristico, che verrà ora descritto.

6.2 Metodi euristici

La progettazione delle euristiche presentate si basa sull'idea consolidata di risolvere iterativamente una versione rilassata e semplificata del problema, in cui tutte le variabili binarie e intere diventano continue (pur mantenendo i bound originari) e viene fissato il valore di un certo sottoinsieme di variabili, per ridurre la complessità del modello.

Abbiamo inizialmente scelto un campione di istanze per verificare se e quanto il rilassamento continuo, calcolato da CPLEX, poteva impattare sui tempi di esecuzione e la precisione della soluzione ottima trovata. Abbiamo testato diverse combinazioni di variabili rilassate, ma le performance migliori si sono ottenute applicando il rilassamento su tutte.

I risultati hanno confermato che il rilassamento delle variabili impatta in maniera positiva sui tempi di esecuzione, riducendoli in maniera consistente, e che questa tecnica poteva quindi essere impiegata nello sviluppo dell'euristica. In seguito abbiamo valutato quale fosse il set di variabili ottimale cui fissare il valore, e abbiamo scelto le y_i , in quanto le z_i , s_i e o_i sono variabili ausiliarie legate al fattore di interferenza, mentre le f_{ij}^{sd} dipendono in maniera diretta dal posizionamento dei droni.

	Numero di posizioni fissate					
	0	1	2	3	4	5
	Tempo alla sol. ottima (ms)					
i0_u5_p25	734	615	590	527	/	/
i1_u5_p25	1591	816	719	687	470	444
i2_u5_p25	983	934	561	531	/	/

Tabella 6.1 Effetti del fix delle variabili sul tempo di esecuzione

Fissando il valore di ciascuna y_i attraverso l'algoritmo euristico si ottiene un modello più semplice da risolvere, dato che il sotto-problema del posizionamento dei droni è già stato risolto, e rimane quindi quello relativo al dimensionamento dei flussi. Per dare una conferma sperimentale alla nostra scelta, abbiamo osservato su un campione ridotto di istanze (Tabella 6.1) che incrementando il numero di variabili y_i fissato i tempi di esecuzione si riducono sensibilmente.

Sono state analizzate tre semplici istanze con 5 client posizionati casualmente e una griglia 5x5. Le istanze sono state risolte fissando manualmente, in maniera incrementale, le variabili y_i che costituiscono la soluzione ottima.

Per ridurre ulteriormente i tempi medi di esecuzione dell'euristica abbiamo poi scelto di massimizzare il numero di variabili di cui è possibile pre-elaborare il valore, una volta effettuato l'assegnamento delle y_i . In particolare, è possibile determinare i valori delle variabili s_i , o_i , z_i , e quelli di f_{ij}^{sd} solo se $y_i = 0$ o $y_j = 0$. In questo modo il modello diventa un problema lineare facilmente risolvibile, e lo si può impiegare per determinare in maniera rapida se una soluzione intera esiste. Lo schema di assegnazione risultante è il seguente:

1. $\forall i \in P \mid y_i = 0$:

- $z_i = 0$;
- $s_i = 0$;
- $o_i = 0$;
- $f_{ij}^{sd} = 0$ e $f_{ji}^{sd} = 0 \forall j \in V \cup P$

2. $\forall i \in P \mid y_i = 1$:

- $z_i = 1$ se $\exists j \in P \cup V \mid d(i, j) \leq R_\epsilon$, 0 altrimenti;
- $s_i = \sum_{\substack{j \in P: \\ R_\epsilon < d(i, j) \leq R}} A_{ji} y_j + \sum_{\substack{j \in V: \\ d(i, j) \leq R}} A_{ji}$ se $z_i = 1$, S_{max} altrimenti;

- $o_i = 1$ se $s_i \geq S_{max}$, 0 altrimenti;

Presenteremo ora gli algoritmi relativi alle due euristiche sviluppate, che possono essere classificate come euristiche costruttive greedy, in quanto partono da una soluzione iniziale, ottenuta con il rilassamento continuo, e successivamente esplorano lo spazio delle variabili y_i .

6.2.1 Euristica Set Y

Algorithm 1 Euristica Set Y

```

1: Set  $Y = \emptyset$ . Let  $\bar{Y} = \{i \in P \wedge i \notin Y\}$ 
2:  $yValues = solveRelaxedLP(Y)$ 
3:  $descendingSort(yValues)$ 
4:  $i = \arg \max_{i \notin Y} yValues$ 
5:  $Y = Y \cup \{i\}$ 
6: while  $((!intSolutionFound) \wedge (|Y| < |yValues|))$  do
7:    $\forall j \in Y$  set model's  $y_j$  variable to 1
8:    $\forall j \in \bar{Y}$ , set model's  $y_j$  variable to 0
9:    $solution = solveRelaxedLP(Y)$ 
10:  if  $(relaxedSolutionFound)$  then
11:     $solution = solveIntegralLP(Y)$ 
12:    if  $(IntegralSolutionFound)$  then
13:       $intSolutionFound = true$ 
14:    else
15:       $i = \arg \max_{i \notin Y} yValues$ 
16:       $Y = Y \cup \{i\}$ 
17:    end if
18:  else
19:     $i = \arg \max_{i \notin Y} yValues$ 
20:     $Y = Y \cup \{i\}$ 
21:  end if
22: end while
23: if  $(intSolutionFound)$  then
24:  return  $solution$ 
25: else
26:  return  $null$ 
27: end if

```

Definiamo l'insieme Y della soluzione finale, che inizialmente sarà vuoto e crescerà iterativamente inserendovi le variabili y_i selezionate (linea 1).

La soluzione iniziale (cioè l'array y_i) viene determinata risolvendo il rilassamento continuo (linea 2).

Dato che le variabili y_i ora sono continue nel range $[0, 1]$, non c'è più un modo

univoco per determinare se un drone deve essere posizionato o no in una certa posizione i . La nostra euristica è guidata dall'idea che più il valore di y_i è vicino a 1, più è probabile che un drone debba effettivamente essere posizionato in quella posizione.

Per questo motivo, ordiniamo in modo decrescente l'array della soluzione iniziale e aggiungiamo il valore più alto all'insieme Y (linee 3-5).

Successivamente si itera finchè viene trovata una soluzione intera (che sarà quella euristicamente ottima perchè costituita dal minor numero di droni possibile) o finchè tutte le y_i sono state inserite in Y , che si traduce nell'impossibilità di trovare una soluzione per l'istanza.

Ogni volta che si aggiunge un nuovo elemento in Y , il modello viene aggiornato ponendo tutte le $y_i \in Y$ a 1 e tutte le $y_i \in \bar{Y}$ a 0 (linee 7-8). Questo viene fatto in maniera efficiente modificando i bound delle variabili, piuttosto che aggiungendo ulteriori vincoli.

Dopodichè si risolve il rilassamento del modello aggiornato e si verifica se è stata trovata una soluzione (linea 9). Se la soluzione non esiste, viene aggiunto un nuovo elemento a Y e si passa all'iterazione successiva (linee 18-20).

Se la soluzione del rilassamento esiste, si converte il modello da LP a MIP e si esegue l'ottimizzazione intera (linea 11). Se esiste una soluzione intera, l'algoritmo termina con successo e restituisce la soluzione trovata (linee 13,24), altrimenti cerca il successivo elemento da aggiungere a Y e passa all'iterazione successiva (linee 14-16).

6.2.2 Euristica Binary Y

In questa euristica si effettua una ricerca binaria sul numero di droni, nel seguente modo: si genera la soluzione iniziale risolvendo il rilassamento continuo e si ordina il vettore di y_i risultante in maniera decrescente (linea 4). Indichiamo con $\sigma(i)$ la posizione di i in tale vettore, mentre n sarà il cursore che guiderà la ricerca binaria.

Ad ogni iterazione, si settano a 1 le variabili y_i del modello tali che la loro posizione nel vettore ordinato sia $\sigma(i) \leq n$ (linea 8), e a 0 le restanti, e successivamente si fissano i valori delle variabili s_i , o_i , z_i come descritto nella sezione 6.2. Successivamente si risolve il modello LP. In base al risultato dell'esecuzione del modello, si modifica di conseguenza l'intervallo di ricerca (linee 11-17), e si mantiene la soluzione migliore fin'ora trovata (linea 14). Al termine delle iterazioni si effettua una ulteriore ottimizzazione per tentare di ridurre ulteriormente il numero di droni necessari, se possibile (linea 20).

Algorithm 2 Euristic Binary Y

```

1:  $yValues = solveRelaxedLP()$ 
2: let  $\sigma(i)$  be the position of  $i$  in the array  $yValues$ 
3: let  $n^* = |P|$  be the drones' number of the best solution found
4:  $descendingSort(yValues)$ 
5:  $\bar{n} = |P|$ ,  $\underline{n} = 1$ 
6: while ( $\underline{n} \leq \bar{n}$ ) do
7:    $n = \lfloor (\bar{n} + \underline{n})/2 \rfloor$ 
8:   set model's variable  $y_i = 1$  if  $\sigma(i) \leq n$ , 0 otherwise
9:   set model's variables  $z_i, o_i, s_i$ 
10:   $solution = solveIntegralLP()$ 
11:  if ( $intSolutionFound$ ) then
12:     $\bar{n} = n - 1$ 
13:    if ( $n \leq n^*$ ) then
14:       $n^* = n$ 
15:    end if
16:  else
17:     $\underline{n} = n + 1$ 
18:  end if
19: end while
20: set model's variable  $y_i = 1$  if  $\sigma(i) \leq n^*$ 
21:  $solution = solveIntegralLP()$ 
22: if ( $intSolutionFound$ ) then
23:  return  $solution$ 
24: else
25:  return  $null$ 
26: end if

```

Capitolo 7

Risultati computazionali

7.1 Costruzione del dataset

Abbiamo preso in considerazione due tipologie di istanze, basate sui set di posizioni potenziali P e illustrate in Figura 7.1, rappresentanti diversi scenari.

La prima tipologia consiste in griglie quadrate o rettangolari $L \times H$ (lunghezza x altezza, in numero di punti) complete, ovvero in cui in ogni punto interno è possibile posizionare un drone. Le griglie rettangolari, soprattutto se $L \ll H$ (o viceversa), si rivelano particolarmente interessanti in quanto permettono la costruzione di vere e proprie catene di droni. La seconda tipologia invece (griglie bottleneck *btn25*, *btn41*, *btn48* [53], dove 25, 41 e 48 sono il numero di posizioni ammissibili) include posizioni vietate, dette no-flight zones, causate per esempio da ostacoli o divieti di sorvolo. Queste particolari configurazioni vengono implementate costruendo la griglia completa e successivamente ponendo a 0 il valore minimo e massimo del dominio delle variabili y_i corrispondenti a posizioni vietate.

Le posizioni degli utenti sono state generate in maniera casuale attorno all'area della griglia, con maggiore probabilità attorno ai bordi (ad esempio, le croci blu in Figura 7.1), assicurandosi che tutti i client si trovassero a distanze minori di

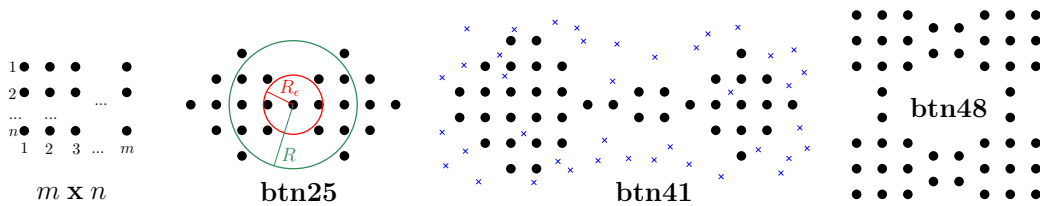


Figura 7.1 Tipologie di griglie utilizzate.

R da ciascun punto $i \in P$, per evitare istanze impossibili da risolvere a causa del cattivo posizionamento.

Test preliminari per il dimensionamento del dataset hanno dimostrato l'impossibilità di risolvere istanze, con i vincoli temporali e di memoria stabiliti, con un numero di clients $n \geq 30$.

Le griglie complete impiegate nel dataset, identificate dalla loro dimensione (lunghezza x altezza, in numero di punti) sono le seguenti: 4x8, 6x6, 9x9, 5x10, 6x15, 8x20.

Oltre a queste, come già accennato, sono state utilizzate le griglie speciali *btn25*, *btn41*, *btn48*.

Per ogni griglia e per ogni numero di utenti nell'insieme $\{5, 10, 15, 20, 25, 30\}$ sono state generate 3 istanze casuali, generando in maniera casuale le posizioni degli utenti e le matrici di traffico.

7.1.1 Relazione tra dimensione delle istanze e tempi di esecuzione

Nella fase di dimensionamento del dataset abbiamo cercato di identificare quali parametri, di una generica istanza, influissero maggiormente sui tempi di esecuzione di CPLEX, e in che maniera:

- Il numero di client influisce notevolmente sulle dimensioni del modello, in quanto da esso dipende direttamente il numero di commodities dell'istanza ($|K| = n(n-1)$), e di conseguenza il numero di variabili f_{ij}^{sd} generate, il numero di vincoli di flusso (5.1) e il numero di termini dei vincoli (5.2) e (5.3);
- Il numero di punti della griglia è un altro fattore decisivo per i tempi di esecuzione, poiché la cardinalità dell'insieme di posizioni potenziali P è direttamente proporzionale al numero totale di vincoli generati dal modello;
- Il range trasmissivo dei nodi (sia droni che client) influenza la cardinalità dell'insieme di variabili f_{ij}^{sd} , in quanto vengono generate solo quelle tali che $d(i, j) \leq R$, e il numero di termini delle sommatorie nei vincoli (5.5) e (5.8), in quanto dipendenti dal numero di posizioni potenziali nel range di ciascun nodo.

7.2 Risultati

Come detto nel Capitolo 6, il modello è stato implementato in C++ utilizzando le CPLEX Callable Library (C API), con tempo massimo di esecuzione di 2400 secondi (40 minuti), parallelismo deterministico e focus sull'ottimizzazione della memoria. Per le griglie si è utilizzato uno step di 5m (inteso come distanza, in metri, tra due punti adiacenti) e ai nodi è stato assegnato un range trasmissivo $R = 50m$ e una area critica di raggio $R_c = 15m$.

Le istanze sono state risolte su un sistema con 4 processori Intel Xeon E5520 @2.27 GHz e 32 GB di RAM.

7.2.1 Risultati con metodi esatti

I risultati ottenuti elaborando il dataset con CPLEX v12.6.0 sono mostrati in Tabella 7.1. Ogni riga contiene i dati aggregati dell'esecuzione di tre istanze per ogni combinazione griglia-client.

Le prime due colonne indicano il nome della griglia e il numero di client che vi sono stati posizionati casualmente. Le colonne AVG(sec), MIN(sec) e MAX(sec) indicano, rispettivamente, il tempo medio, minimo e massimo per ottenere la soluzione ottima, espresso in secondi. AVG(UAV) indica il numero medio di droni richiesti dalle istanze, mentre AVG(gap) indica il gap medio relativo tra il valore ottimo della funzione obbiettivo e il suo migliore bound noto tra tutti i nodi aperti rimanenti. Quando un problema viene risolto all'ottimo, il best bound coincide con valore della soluzione, e il gap varrà quindi 0. Infine, la colonna # end indica quante istanze, sul totale per ogni combinazione griglia-client, sono state risolte all'ottimo entro il tempo limite.

Si può notare che, a parità di griglia, ad ogni incremento del numero di client si ha un aumento di circa un ordine di grandezza dei tempi per trovare la soluzione ottima. Lo stesso aumento si può notare al raddoppiare del numero di punti della griglia. Per poter risolvere all'ottimo istanze fino a 30 utenti è necessario impiegare griglie sufficientemente piccole, al di sotto dei 25-30 punti.

All'interno di ogni combinazione griglia-client il valore della funzione obbiettivo, cioè il numero di droni posizionati, si dimostra pressoché stabile, con variazioni medie di 0-1 unità. Il numero di droni è generalmente basso (ad eccezione delle istanze in cui non viene trovata una soluzione entro il limite temporale) in quanto il range di 50m selezionato offre un'ampia copertura rispetto la dimensione media delle griglie. Ridurre il range, aumentare la dimensione della griglia o la sua

grana sono espedienti che possono essere utilizzati per incrementare il numero medio di droni impiegato.

Anche l'incremento degli utenti causa un aumento medio nel numero di droni a causa della maggior banda richiesta.

7.2.2 Risultati con metodi euristici

In Tabella 7.2 sono mostrati i risultati ottenuti tramite gli algoritmi euristici descritti nella sezione 6.2. Oltre alle colonne precedentemente descritte in sezione 7.2.1, la colonna AVG(itr.) indica il numero medio di iterazioni compiuti dall'algoritmo euristico per trovare la soluzione ottima.

Dal punto di vista temporale, l'euristica Set Y impiega generalmente meno tempo a trovare la soluzione ottima rispetto alla Binary Y: considerando le sole istanze che hanno fornito una soluzione ottima entro il time limit, Set Y impiega un tempo minore circa il 63% delle volte. Le differenze delle tempistiche sembrano essere molto variabili, entro un range del 15%-70%.

Una delle possibili cause può essere data dal fatto che l'algoritmo Set Y, ad ogni iterazione, cerca di risolvere il problema MIP solamente se il rilassamento continuo, generalmente molto più veloce, ha fornito una soluzione, risparmiando così tempo di elaborazione qualora non ci fosse. Riformulando l'algoritmo Binary Y potrebbe essere possibile migliorarne fortemente le performance temporali.

Per quanto riguarda invece la precisione della soluzione, ovvero il numero di droni minimo necessario, se si escludono tutte le istanze che non hanno saputo trovare la soluzione ottima entro il tempo limite, non si notano differenze rilevanti tra i due algoritmi, in quanto lo scarto tende a essere compreso tra 0 e 2 droni.

7.2.3 Confronto tra metodi esatti ed euristici

Nella Tabella 7.3 vengono confrontati i risultati ottenuti con CPLEX e con le due euristiche.

Valutando le performance dal punto di vista della precisione della soluzione, e considerando le sole istanze che non hanno superato il time limit (34 istanze sul totale del dataset), si nota che la variazione nel numero medio di droni è 0 nel 41% delle istanze, di 1 nel 32%, di 2 nel 12%, e di più di 2 nel 15%.

Dal punto di vista dei tempi di risoluzione, il confronto può essere fatto osservando la Tabella 7.4, in cui si mostra il numero di volte in cui le euristiche hanno trovato la soluzione ottima più velocemente di CPLEX. La colonna Ties raggruppa tutte

Griglia	Utenti	AVG (sec)	MIN (sec)	MAX (sec)	AVG (UAV)	AVG (gap)	# end
4x8	5	0,7	0,5	0,9	1	0,0	3
4x8	10	14,0	11,9	15,6	4	0,0	3
4x8	15	71,7	56,0	87,7	3	0,0	3
4x8	20	281,5	181,4	397,3	11	0,0	3
4x8	25	1394,7	1051,1	1779,0	7	0,0	3
4x8	30	2400,0	2400,0	2400,0	32	1,0	0
5x10	5	1,6	1,6	1,7	1	0,0	3
5x10	10	38,9	30,9	44,7	4	0,0	3
5x10	15	285,6	265,1	304,5	3	0,0	3
5x10	20	965,3	923,5	995,9	16	0,0	3
5x10	25	2401,3	2400,8	2402,0	50	0,9	0
5x10	30	2400,6	2400,5	2400,6	50	1,0	0
6x15	5	14,3	12,2	17,3	2	0,0	3
6x15	10	455,6	347,8	611,4	5	0,0	3
6x15	15	1550,1	1019,7	2400,7	4	0,1	2
6x15	20	2400,8	2400,5	2401,4	90	0,9	0
6x15	25	2400,6	2400,6	2400,6	90	1,0	0
6x15	30	2400,0	2400,0	2400,0	90	1,0	0
6x6	5	0,7	0,7	0,8	1	0,0	3
6x6	10	13,8	12,8	14,5	4	0,0	3
6x6	15	143,2	104,3	214,2	3	0,0	3
6x6	20	411,5	393,0	442,1	16	0,0	3
6x6	25	1466,3	1283,7	1581,0	7	0,0	3
6x6	30	2400,7	2400,4	2401,2	36	0,8	0
8x20	5	125,2	71,9	223,3	2	0,0	3
8x20	10	2352,8	2256,5	2401,4	29	0,6	1
8x20	15	2403,0	2400,7	2407,3	118	1,0	0
8x20	20	2403,9	2402,2	2406,0	157	1,0	0
8x20	25	2400,0	2400,0	2400,0	160	1,0	0
8x20	30	2400,0	2400,0	2400,0	160	1,0	0
9x9	5	9,7	6,1	12,3	1	0,0	3
9x9	10	210,4	139,6	282,7	4	0,0	3
9x9	15	1444,1	1087,0	2053,4	3	0,0	3
9x9	20	2400,7	2400,5	2401,0	80	1,0	0
9x9	25	2400,6	2400,6	2400,7	81	1,0	0
9x9	30	2400,0	2400,0	2400,0	81	1,0	0
btn25	5	0,6	0,4	0,7	1	0,0	3
btn25	10	6,3	6,0	6,7	2	0,0	3
btn25	15	42,2	31,6	52,7	3	0,0	3
btn25	20	150,5	136,8	172,4	5	0,0	3
btn25	25	541,7	498,0	576,1	7	0,0	3
btn25	30	1193,6	976,5	1343,8	10	0,0	3
btn41	5	2,3	1,8	2,6	2	0,0	3
btn41	10	33,7	31,8	36,7	2	0,0	3
btn41	15	903,4	198,3	2234,0	4	0,0	3
btn41	20	816,1	332,5	1190,1	6	0,0	3
btn41	25	1908,9	1640,1	2219,2	8	0,0	3
btn41	30	2401,1	2400,7	2401,6	43	0,7	0
btn48	5	2,5	1,7	3,1	1	0,0	3
btn48	10	39,7	36,9	42,7	4	0,0	3
btn48	15	236,9	219,6	258,6	3	0,0	3
btn48	20	2370,7	2308,9	2401,9	23	0,2	1
btn48	25	2204,7	1812,2	2401,0	31	0,4	1
btn48	30	2400,2	2400,0	2400,7	48	1,0	0

Tabella 7.1 Risultati dataset risolto con CPLEX v12.6.0

Griglia	Utenti	Set Y						Binary Y							
		AVG (sec)	MIN (sec)	MAX (sec)	AVG (UAV)	AVG (gap)	# end	AVG (itr.)	AVG (sec)	MIN (sec)	MAX (sec)	AVG (UAV)	AVG (gap)	# end	AVG (itr.)
4x8	5	0,6	0,5	0,6	3	0,0	3	3	1,4	1,3	1,5	3	0,0	3	4
4x8	10	8,2	7,9	8,5	5	0,0	3	5	13,1	9,8	15,5	5	0,0	3	4
4x8	15	65,9	60,9	71,7	3	0,0	3	3	89,0	84,3	92,5	3	0,0	3	4
4x8	20	307,3	283,9	321,9	11	0,0	3	11	487,8	388,7	594,2	11	0,0	3	5
4x8	25	1194,9	737,8	1970,0	7	0,0	3	7	638,9	583,0	716,3	7	0,0	3	4
4x8	30	2400,0	2400,0	2400,0	32	1,0	0	17	2400,0	2400,0	2400,0	32	1,0	0	4
5x10	5	1,4	1,4	1,5	1	0,0	3	1	3,8	3,3	4,8	2	0,0	3	5
5x10	10	47,6	46,3	48,6	4	0,0	3	4	39,9	38,8	40,5	4	0,0	3	4
5x10	15	250,2	225,6	264,0	5	0,0	3	5	275,3	235,1	315,1	5	0,0	3	5
5x10	20	686,3	541,1	927,9	17	0,0	3	17	862,6	716,4	964,6	17	0,0	3	5
5x10	25	2400,4	2400,0	2400,2	36	0,7	1	27	2225,7	1877,0	2400,0	21	0,3	2	3
5x10	30	2400,0	2400,0	2400,0	50	1,0	0	31	2400,0	2400,0	2400,0	50	1,0	0	3
6x15	5	7,1	6,5	7,6	3	0,0	3	3	20,1	19,3	21,1	3	0,0	3	6
6x15	10	639,0	491,2	869,6	7	0,0	3	7	780,4	633,0	1049,0	7	0,0	3	5
6x15	15	1676,8	1211,6	2072,9	5	0,0	3	5	1089,7	896,2	1212,7	5	0,3	3	6
6x15	20	2400,0	2400,0	2400,0	77	0,7	1	54	2235,1	1905,3	2400,0	54	0,3	2	6
6x15	25	2400,0	2400,0	2400,0	90	1,0	0	54	2400,0	2400,0	2400,0	79	0,7	1	4
6x15	30	2400,0	2400,0	2400,0	90	1,0	0	51	2400,0	2400,0	2400,0	90	1,0	0	5
6x6	5	0,7	0,6	0,7	1	0,0	3	1	2,4	2,0	2,9	2	0,0	3	5
6x6	10	19,3	16,8	22,9	4	0,0	3	4	18,3	17,8	18,7	4	0,0	3	5
6x6	15	124,0	117,4	129,7	3	0,0	3	3	89,1	80,2	98,2	3	0,0	3	4
6x6	20	409,6	362,0	444,8	16	0,0	3	16	474,1	404,8	526,7	16	0,0	3	4
6x6	25	1330,8	1076,3	1477,8	7	0,0	3	7	835,4	795,5	862,0	7	0,0	3	4
6x6	30	2400,2	2400,0	2400,0	31	0,7	1	23	2400,0	2400,0	2400,0	33	0,7	1	2
8x20	5	49,9	45,3	55,5	3	0,0	3	3	174,5	125,0	226,7	3	0,0	3	7
8x20	10	1313,4	961,0	1675,2	8	0,0	3	8	2400,0	2400,0	2400,0	109	0,7	1	7
8x20	15	2400,0	2400,0	2400,0	160	1,0	0	72	2400,0	2400,0	2400,0	134	0,7	1	7
8x20	20	2400,0	2400,0	2400,0	160	1,0	0	75	2400,0	2400,0	2400,0	160	1,0	0	8
8x20	25	2400,0	2400,0	2400,0	160	1,0	0	83	2400,0	2400,0	2400,0	160	1,0	0	7
8x20	30	2400,0	2400,0	2400,0	160	1,0	0	70	2400,0	2400,0	2400,0	160	1,0	0	7
9x9	5	5,7	5,5	5,8	2	0,0	3	2	16,5	14,1	18,0	2	0,0	3	6
9x9	10	198,2	180,4	223,8	4	0,0	3	4	231,1	210,5	257,4	4	0,0	3	6
9x9	15	962,3	869,4	1142,9	4	0,0	3	4	1053,1	830,6	1271,4	4	0,0	3	5
9x9	20	2400,0	2400,0	2400,0	60	0,7	1	31	2400,0	2400,0	2400,0	60	0,7	1	4
9x9	25	2400,0	2400,0	2400,0	81	1,0	0	61	2400,0	2400,0	2400,0	61	0,7	1	3
9x9	30	2400,0	2400,0	2400,0	81	1,0	0	41	2400,0	2400,0	2400,0	81	1,0	0	4
btn25	5	1,0	1,0	1,1	2	0,0	3	2	2,3	1,9	2,8	2	0,0	3	5
btn25	10	33,7	31,2	35,4	4	0,0	3	4	30,7	27,5	33,3	4	0,0	3	5
btn25	15	116,7	59,5	145,8	3	0,0	3	3	280,0	254,3	331,1	3	0,0	3	4
btn25	20	738,3	693,1	772,9	16	0,0	3	16	775,0	659,0	883,8	16	0,0	3	5
btn25	25	605,1	568,5	667,8	7	0,0	3	7	1995,1	1651,9	2250,6	7	0,0	3	5
btn25	30	2400,0	2400,0	2400,0	45	1,0	0	12	2400,0	2400,0	2400,0	45	1,0	0	5
btn41	5	4,0	2,8	5,2	3	0,0	3	3	7,1	5,7	8,4	3	0,0	3	6
btn41	10	189,7	69,7	283,3	6	0,0	3	6	130,9	77,7	187,2	6	0,0	3	6
btn41	15	967,9	481,9	1631,0	9	0,0	3	9	649,4	461,5	822,5	9	0,0	3	6
btn41	20	2400,0	2400,0	2400,0	62	0,7	1	33	2031,2	1293,5	2400,0	62	0,7	1	6
btn41	25	2400,0	2400,0	2400,0	90	1,0	0	45	2157,1	1671,3	2400,0	68	0,7	1	3
btn41	30	2400,0	2400,0	2400,0	90	1,0	0	48	2400,0	2400,0	2400,0	68	0,7	1	2
btn48	5	2,3	2,2	2,5	2	0,0	3	2	15,2	14,2	16,5	2	0,0	3	6
btn48	10	108,6	106,3	109,8	4	0,0	3	4	96,4	89,8	106,5	4	0,0	3	6
btn48	15	385,1	284,1	474,6	4	0,0	3	4	423,5	384,6	446,4	4	0,0	3	5
btn48	20	1681,3	1632,7	1770,7	16	0,0	3	16	2285,6	2056,7	2400,0	32	0,3	2	4
btn48	25	2320,8	2162,4	2400,0	45	0,7	1	17	2400,0	2400,0	2400,0	45	0,7	1	4
btn48	30	2400,0	2400,0	2400,0	64	1,0	0	29	2400,0	2400,0	2400,0	64	1,0	0	4

Tabella 7.2 Risultati dataset risolto con algoritmi euristici

quelle istanze in cui la soluzione ottima non è stata trovata a causa del limite temporale. Anche in questa tabella si verifica che l'algoritmo Set Y è mediamente più veloce di Binary Y.

Osservando le figure 7.3-7.6 si può notare che nel confronto tra CPLEX e le euristiche, sia i tempi medi che la precisione media delle soluzioni, in termini di ordine di grandezza, sono confrontabili. Analizzando le singole istanze, invece, ci sono molteplici casi in cui le euristiche hanno performance migliori di CPLEX e vice-versa (Figura 7.2).

In Figura 7.7 vengono mostrate, a titolo di esempio, le due griglie più piccole e le due più grandi del dataset, e si confrontano i tempi medi di risoluzione di CPLEX e delle due euristiche. Mentre nelle griglie più piccole il plateau del time limit non è mai raggiunto, o solo per le istanze limite di 30 utenti, per le istanze più grandi viene raggiunto già con 10-15 utenti.

Si fa notare inoltre il singolare fatto che entrambe le euristiche dimostrino performance scadenti contro le griglie *btn*, perdendo quasi sempre contro di CPLEX (Figura 7.2). Si ipotizza che la maggior difficoltà di queste istanze possa aver gravato sulle risoluzioni iterative dei problemi MIP, oppure che le variabili y_i da fissare vengano selezionate in una maniera non ottimale, rimettendo in discussione l'ipotesi che tanto più il valore di y_i è prossimo a 1, tanto più è probabile che tale posizione venga scelta nella soluzione ottima.

Si conclude quindi che l'uso di algoritmi euristici è una scelta necessaria e obbligata per la risoluzione in tempi ragionevoli di istanze medio-grandi del problema I-DARNC.

I due algoritmi presentati, nella loro semplicità, hanno dimostrato la possibilità di ridurre in maniera anche considerevole i tempi per giungere all'ottimo pur mantenendo una sufficiente precisione.

Tali euristiche possono rappresentare un primo passo per la determinazione di algoritmi euristici efficienti e precisi per la risoluzione di istanze medio-grandi del problema I-DARNC.

		CPLEX			Set Y			Binary Y		
Griglia	Numero utenti	AVG (sec)	AVG (UAV)	# end	AVG (sec)	AVG (UAV)	# end	AVG (sec)	AVG (UAV)	# end
4x8	5	0,7	1	3	0,6	3	3	1,4	3	3
4x8	10	14,0	4	3	8,2	5	3	13,1	5	3
4x8	15	71,7	3	3	65,9	3	3	89,0	3	3
4x8	20	281,5	11	3	307,3	11	3	487,8	11	3
4x8	25	1394,7	7	3	1194,9	7	3	638,9	7	3
4x8	30	2400,0	32	0	2400,0	32	0	2400,0	32	0
5x10	5	1,6	1	3	1,4	1	3	3,8	2	3
5x10	10	38,9	4	3	47,6	4	3	39,9	4	3
5x10	15	285,6	3	3	250,2	5	3	275,3	5	3
5x10	20	965,3	16	3	686,3	17	3	862,6	17	3
5x10	25	2401,3	50	0	2400,0	36	1	2368,0	21	2
5x10	30	2400,6	50	0	2400,0	50	0	2400,0	50	0
6x15	5	14,3	2	3	7,1	3	3	20,1	3	3
6x15	10	455,6	5	3	639,0	7	3	780,4	7	3
6x15	15	1550,1	4	2	1676,8	5	3	1089,7	5	3
6x15	20	2400,8	90	0	2400,0	77	1	2589,9	54	2
6x15	25	2400,6	90	0	2400,0	90	0	3159,8	79	1
6x15	30	2400,0	90	0	2400,0	90	0	2400,0	90	0
6x6	5	0,7	1	3	0,7	1	3	2,4	2	3
6x6	10	13,8	4	3	19,3	4	3	18,3	4	3
6x6	15	143,2	3	3	124,0	3	3	89,1	3	3
6x6	20	411,5	16	3	409,6	16	3	474,1	16	3
6x6	25	1466,3	7	3	1330,8	7	3	835,4	7	3
6x6	30	2400,7	36	0	2400,0	31	1	3137,7	33	1
8x20	5	125,2	2	3	49,9	3	3	174,5	3	3
8x20	10	2352,8	29	1	1313,4	8	3	2506,0	109	1
8x20	15	2403,0	118	0	2400,0	160	0	3140,7	134	1
8x20	20	2403,9	157	0	2400,0	160	0	2400,0	160	0
8x20	25	2400,0	160	0	2400,0	160	0	2400,0	160	0
8x20	30	2400,0	160	0	2400,0	160	0	2400,0	160	0
9x9	5	9,7	1	3	5,7	2	3	16,5	2	3
9x9	10	210,4	4	3	198,2	4	3	231,1	4	3
9x9	15	1444,1	3	3	962,3	4	3	1053,1	4	3
9x9	20	2400,7	80	0	2400,0	60	1	2995,1	60	1
9x9	25	2400,6	81	0	2400,0	81	0	3170,3	61	1
9x9	30	2400,0	81	0	2400,0	81	0	2400,0	81	0
btn25	5	0,6	1	3	1,0	2	3	2,3	2	3
btn25	10	6,3	2	3	33,7	4	3	30,7	4	3
btn25	15	42,2	3	3	116,7	3	3	280,0	3	3
btn25	20	150,5	5	3	738,3	16	3	775,0	16	3
btn25	25	541,7	7	3	605,1	7	3	1995,1	7	3
btn25	30	1193,6	10	3	2400,0	45	0	2400,0	45	0
btn41	5	2,3	2	3	4,0	3	3	7,1	3	3
btn41	10	33,7	2	3	189,7	6	3	130,9	6	3
btn41	15	903,4	4	3	967,9	9	3	649,4	9	3
btn41	20	816,1	6	3	2400,0	62	1	2031,2	62	1
btn41	25	1908,9	8	3	2400,0	90	0	2157,1	68	1
btn41	30	2401,1	43	0	2400,0	90	0	2861,4	68	1
btn48	5	2,5	1	3	2,3	2	3	15,2	2	3
btn48	10	39,7	4	3	108,6	4	3	96,4	4	3
btn48	15	236,9	3	3	385,1	4	3	423,5	4	3
btn48	20	2370,7	23	1	1681,3	16	3	2456,5	32	2
btn48	25	2204,7	31	1	2320,8	45	1	2786,8	45	1
btn48	30	2400,2	48	0	2400,0	64	0	2400,0	64	0

Tabella 7.3 Confronto tra metodi di risoluzione

	Griglie complete				Griglie btn			
	Wins (%)	Ties (%)	Loses (%)	Total	Wins (%)	Ties (%)	Loses (%)	Total
Set Y	47.2	38.9	13.8	36	11.1	16.7	72.2	18
Binary Y	25	36.1	38.9	36	5.5	16.7	77.8	18

Tabella 7.4 Confronto tra le euristiche

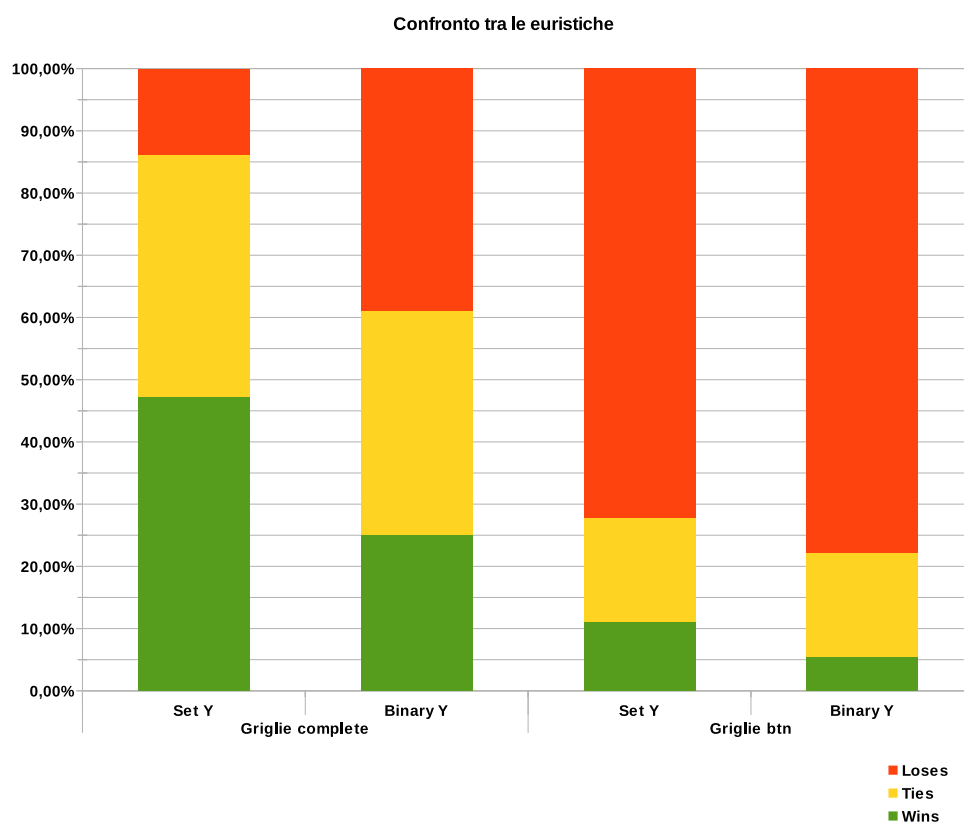


Figura 7.2 Confronto euristiche contro CPLEX

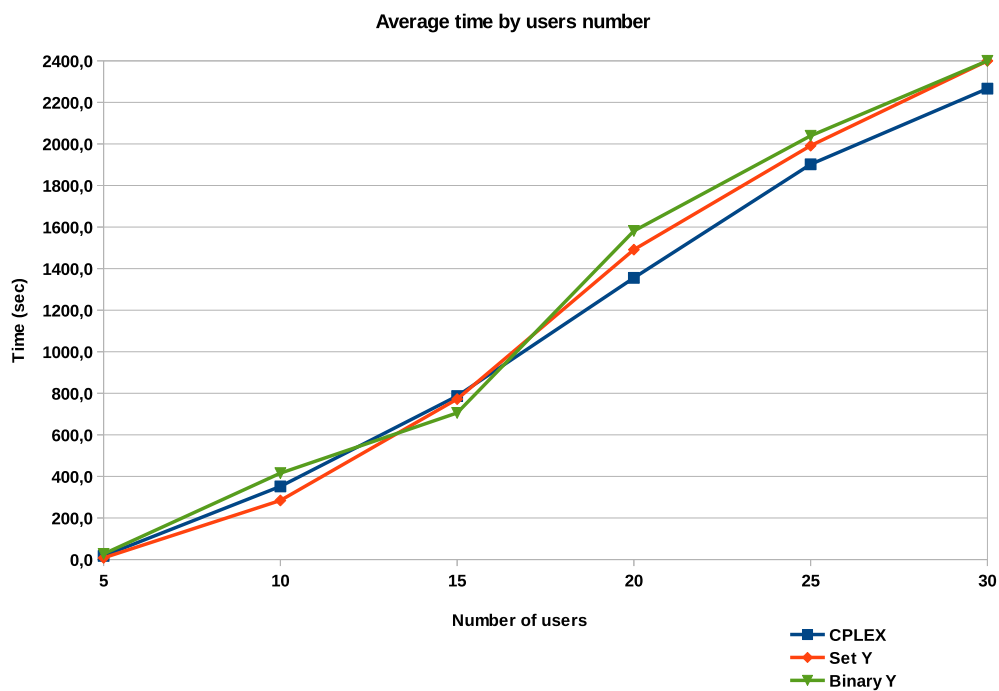


Figura 7.3 Tempo medio risoluzione per classe di utenti

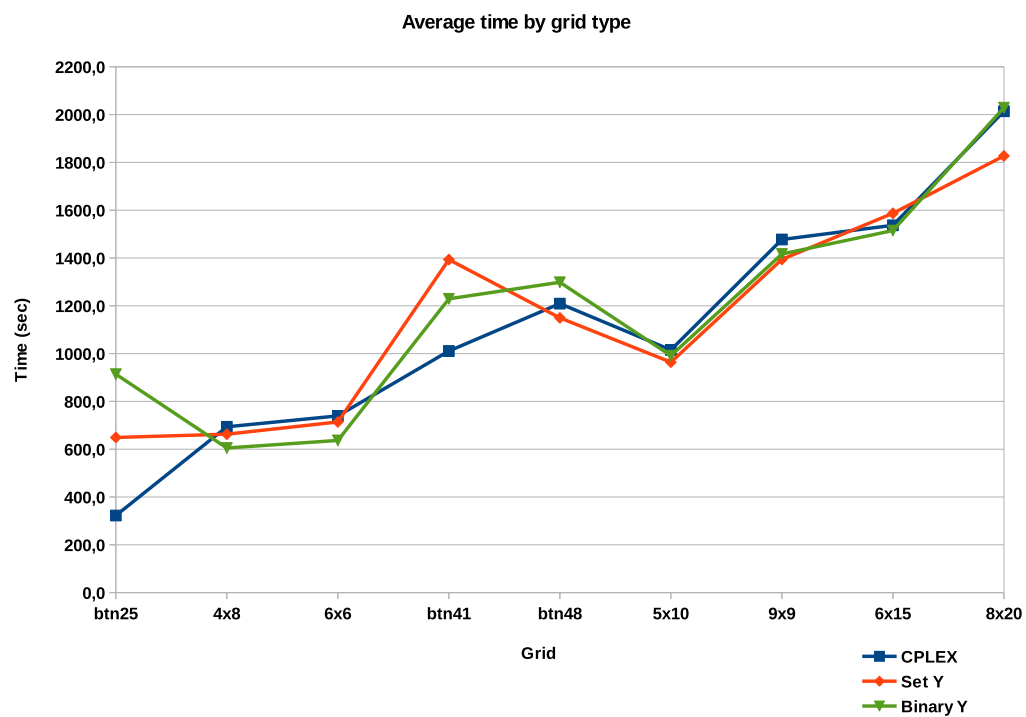


Figura 7.4 Tempo medio risoluzione per griglia

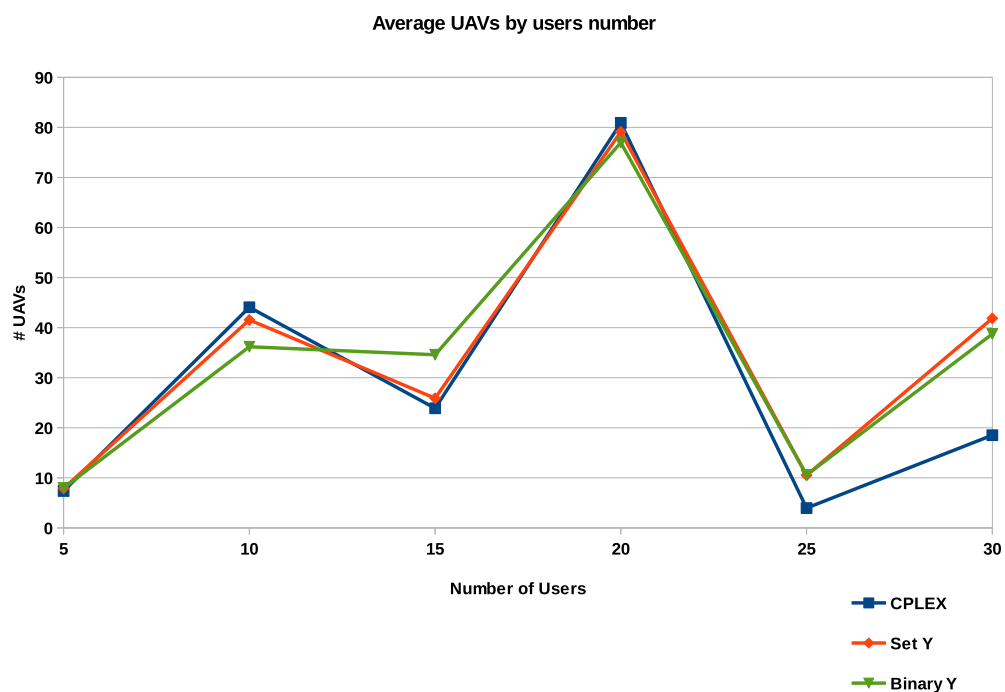


Figura 7.5 Numero medio di droni per classe utenti

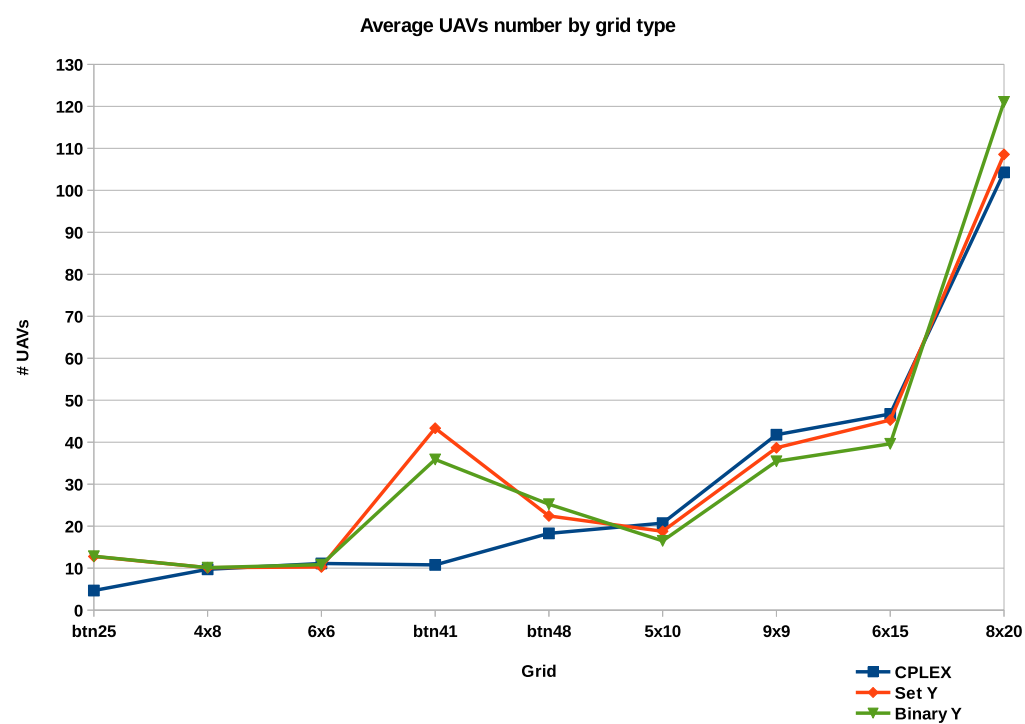


Figura 7.6 Numero medio di droni per griglia

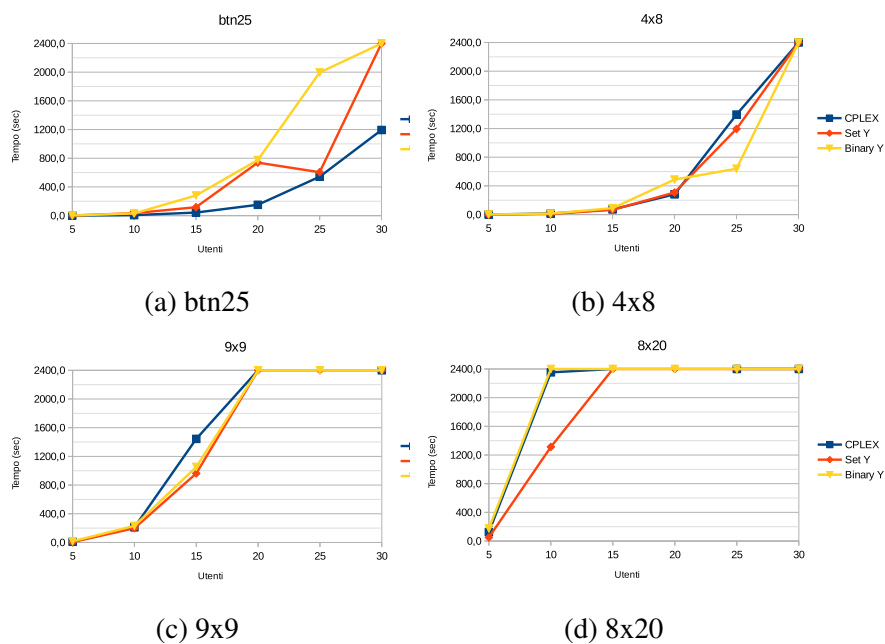


Figura 7.7 Confronto tempi CPLEX - euristiche

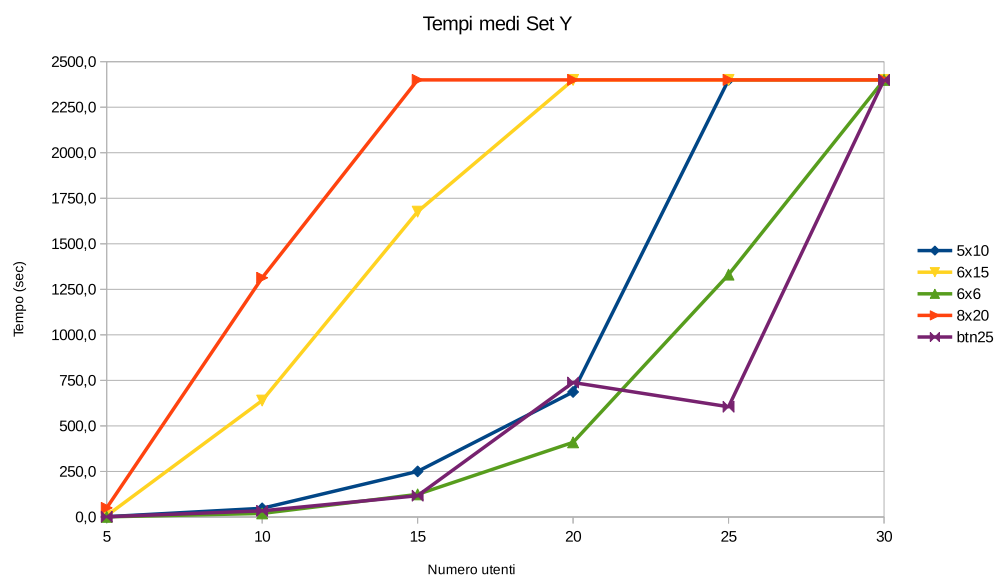


Figura 7.8 Numero medio di droni per griglia

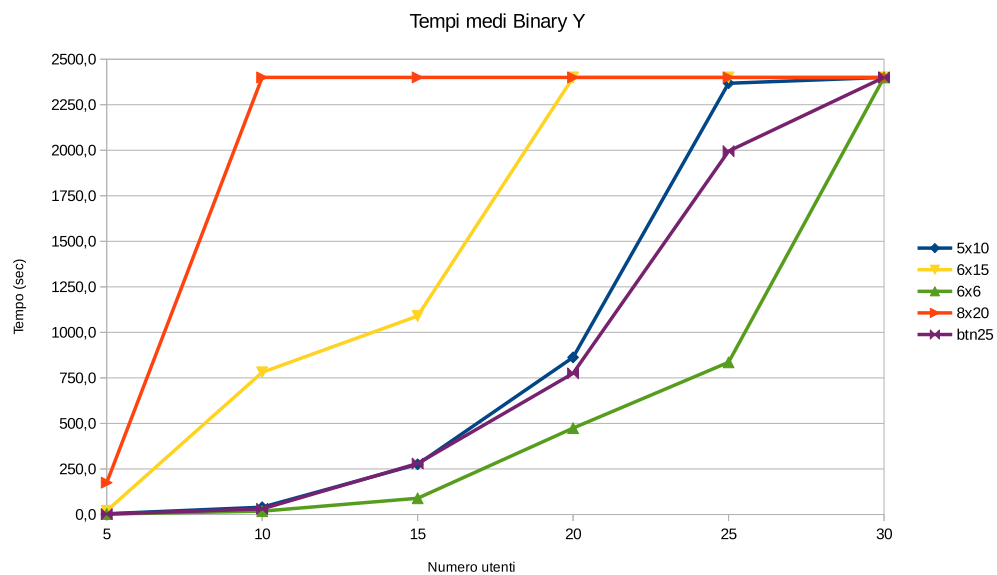


Figura 7.9 Numero medio di droni per griglia

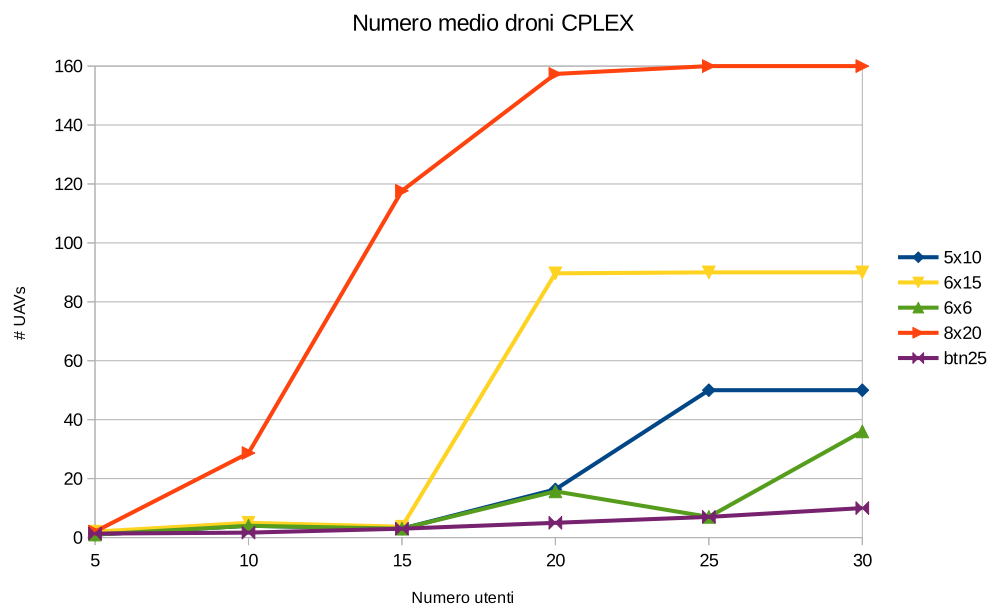


Figura 7.10 Numero medio di droni per griglia

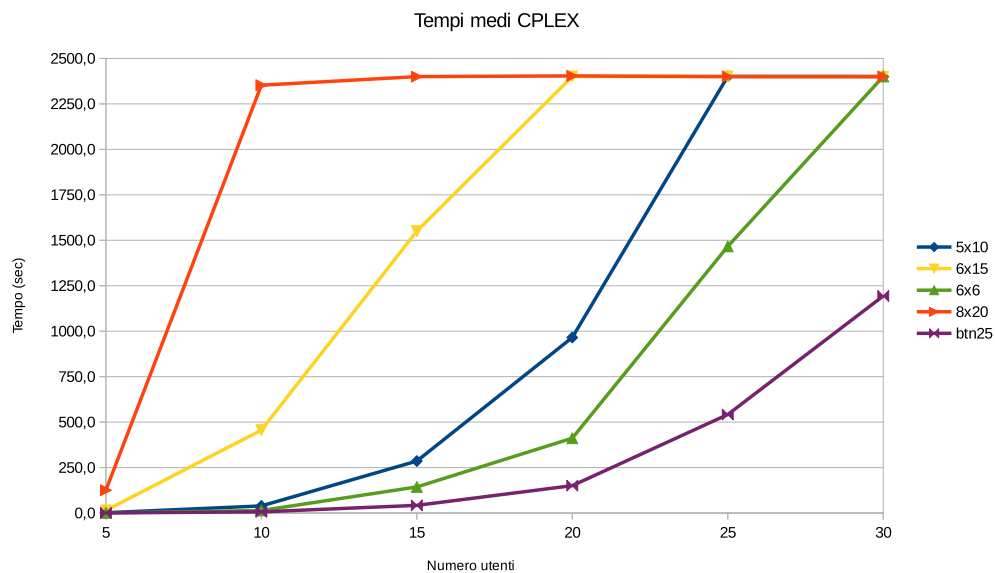


Figura 7.11 Numero medio di droni per griglia

Capitolo 8

Conclusioni

L'impiego dei droni come strumenti di supporto per scopi civili è in costante crescita, e vengono studiati sempre nuovi metodi di impiego, spinti anche dalle concrete possibilità di business emergenti.

L'ambito sperimentale su cui si è concentrata questa tesi è quello di utilizzarli per il deployment rapido e autonomo di una rete di comunicazione di emergenza, da utilizzare in seguito del verificarsi di disastri naturali che hanno compromesso le reti di comunicazione tradizionali. Per fare ciò i droni vengono equipaggiati con Access Points wireless e posizionati nel range dei client per creare una backbone FANET (Flying Ad-hoc Network), consentendo loro di connettersi e comunicare. In questa tesi abbiamo affrontato lo scenario appena descritto formalizzandolo come un nuovo problema di ottimizzazione combinatoria, l'Interference-aware Drone Ad-hoc Relay Network Configuration problem (I-DARNC). Per il problema, abbiamo proposto una formulazione di programmazione lineare intera mista (Mixed Integer Linear Programming - MILP) capace di posizionare in maniera ottimale il minor numero possibile di droni per raggiungere tutti i client e soddisfare le loro richieste di traffico. Di particolare rilievo è il fatto di aver integrato nel modello una rappresentazione delle problematiche derivanti dai fenomeni di interferenza, che hanno un notevole impatto sulle capacità dei canali wireless utilizzati. A tal fine, abbiamo proposto un modello di interferenza locale e statico per stimare l'impatto della vicinanza reciproca dei droni e/o degli utenti sulla qualità delle comunicazioni.

Il modello è stato implementato in C++, utilizzando le librerie di CPLEX, al fine di ottenere con soluzioni off-the-shelf la soluzione ottima del problema. Abbiamo effettuato dei test preliminari per verificare le performance e i limiti del modello, e di fronte all'impossibilità di risolvere istanze medio-grandi in tempi ragionevoli abbiamo sviluppato un algoritmo euristico basata sulla soluzione iterativa

di versioni semplificate del modello, ottenute fissando il valore di un opportuno insieme di variabili.

Infine abbiamo confrontato le performance degli algoritmi euristici contro quelle di CPLEX su un dataset creato ad-hoc, a causa dell'assenza in letteratura di dataset sufficientemente compatibili con il nostro problema, dimostrando che la complessità intrinseca del problema richieda espressamente l'adozione di algoritmi euristici per istanze di dimensioni realistiche.

Possibili sviluppi futuri del lavoro di tesi riguardano la ricerca di formulazioni alternative più efficienti, in termini di riduzione del numero di vincoli e variabili, l'estensione del modello per ridurre il più possibile il set di assunzioni fatte, migliorando così il realismo delle istanze, il perfezionamento del modello di interferenza, per esempio introducendo la presenza di ostacoli naturali e non (vegetazione, montagne, edifici, etc.), e integrandolo in un sistema di validazione per verificare la bontà dei parametri selezionati, iterando fasi di ottimizzazione-validazione, l'introduzione di modelli di random-walk, per simulare il movimento dei client, e di pattern di traffico realistico, l'ampliamento del dataset tramite funzioni di distribuzione dei clients più realistiche, la differenziazione delle caratteristiche di client e droni (diverse capacità e raggi trasmissivi), e lo sviluppo di nuove euristiche, basate su ricerca locale o algoritmi genetici, che risolvano il problema con approcci differenti (per esempio dal punto di vista geometrico dell'intersezione di cerchi, oppure della topologia dei grafi di rete).

Bibliografia

- [1] M. Mazur, A. Wiśniewski, J. McMillan, *et al.*, *Clarity from above - PwC global report on the commercial applications of drone technology*.
- [2] J. F. Keane and S. S. Carr, "A brief history of early unmanned aircraft," *Johns Hopkins APL Technical Digest*, vol. 32, no. 3, pp. 558–571, 2013.
- [3] Amazon.com, "Amazon prime air."
- [4] J. Githens, "Civilian applications of a drone, uav, uas or uvs."
- [5] U. International, *2011-2012 UAS Yearbook - UAS: The Global Perspective*. Blyenburgh and Co., ninth ed., 2011.
- [6] O. K. Sahingoz, "Networking models in flying ad-hoc networks (fanets): Concepts and challenges," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 74, no. 1-2, pp. 513–527, 2014.
- [7] D. Quick, "Solar-powered puma ae small uas stays aloft for over nine hours."
- [8] D. Lukonis, "Solar drone experiments - how much more battery life do you get by adding solar panels to your quad?."
- [9] D. Carrington, "Solar impulse 2 completes first ever atlantic crossing by solar plane."
- [10] M. Zuckerberg, "The technology behind aquila."
- [11] M. Herlich and S. Yamada, "Motivation for a step-by-step guide to set up wireless disaster recovery networks," in *2015 2nd International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM)*, pp. 64–70, Nov 2015.
- [12] G. Jayakumar and G. Gopinath, "Ad hoc mobile wireless networks routing protocols—a review," *J. Comput. Sci*, vol. 3, no. 8, pp. 574–582, 2007.
- [13] C. Elliott and B. Heile, "Self-organizing, self-healing wireless networks," in *2000 IEEE Aerospace Conference. Proceedings (Cat. No.00TH8484)*, vol. 1, pp. 149–156 vol.1, 2000.
- [14] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, "Survey of important issues in uav communication networks," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, pp. 1123–1152, Secondquarter 2016.

- [15] J. L. Kennington, "A survey of linear cost multicommodity network flows," *Operations Research*, vol. 26, no. 2, pp. 209–236, 1978.
- [16] S. Alumur and B. Y. Kara, "Network hub location problems: The state of the art," *European Journal of Operational Research*, vol. 190, no. 1, pp. 1 – 21, 2008.
- [17] D. B. Johnson and D. A. Maltz, *Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks*, pp. 153–181. Boston, MA: Springer US, 1996.
- [18] F. Bai and A. Helmy, "A survey of mobility models," *Wireless Adhoc Networks. University of Southern California, USA*, vol. 206, p. 147, 2004.
- [19] T. Casey, "Solar-powered drones, coming soon to a sky near you."
- [20] B. D. Song, J. Kim, J. Kim, H. Park, J. R. Morrison, and D. H. Shim, "Persistent uav service: An improved scheduling formulation and prototypes of system components," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 74, no. 1, pp. 221–232, 2014.
- [21] O. Bouachir, F. Garcia, N. Larrieu, and T. Gayraud, "Ad hoc network qos architecture for cooperative unmanned aerial vehicles (uavs)," in *Wireless Days (WD), 2013 IFIP*, pp. 1–4, Nov 2013.
- [22] Y. Cai, F. R. Yu, J. Li, Y. Zhou, and L. Lamont, "Medium access control for unmanned aerial vehicle (uav) ad-hoc networks with full-duplex radios and multipacket reception capability," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, pp. 390–394, Jan 2013.
- [23] M. Zennaro and C. Fonda, "Radio laboratory handbook," 2004.
- [24] V. Arokiamary, *Cellular and Mobile Communications*. Technical Publications, 2009.
- [25] T. X. Brown, B. Argrow, C. Dixon, S. Doshi, R.-G. Thekkekunel, and D. Henkel, "Ad hoc uav ground network (augnet)," in *AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference*, pp. 1–11, 2004.
- [26] T. X. Brown, S. Doshi, S. Jadhav, and J. Himmelstein, "Test bed for a wireless network on small uavs," in *Proc. AIAA 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference, Chicago, IL*, pp. 20–23, 2004.
- [27] C. m. Cheng, P. h. Hsiao, H. T. Kung, and D. Vlah, "Performance measurement of 802.11a wireless links from uav to ground nodes with various antenna orientations," in *Proceedings of 15th International Conference on Computer Communications and Networks*, pp. 303–308, Oct 2006.
- [28] D. T. Ho, E. I. Grotli, S. Shimamoto, and T. A. Johansen, "Optimal relay path selection and cooperative communication protocol for a swarm of uavs," in *2012 IEEE Globecom Workshops*, pp. 1585–1590, Dec 2012.
- [29] A. Richards and J. P. How, "Aircraft trajectory planning with collision avoidance using mixed integer linear programming," in *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No.CH37301)*, vol. 3, pp. 1936–1941 vol.3, May 2002.

- [30] O. Burdakov, P. Doherty, K. Holmberg, and P.-M. Olsson, "Optimal placement of uv-based communications relay nodes," *Journal of Global Optimization*, vol. 48, no. 4, pp. 511–531, 2010.
- [31] H. Wang, W. Wang, J. Huang, D. Huo, and Y. Xu, "Modeling multiple unmanned aerial vehicles placement problem in ad hoc network via quadratic unconstrained binary optimization," in *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013 International Conference on*, pp. 926–932, May 2013.
- [32] I. Rubin and R. Zhang, "Placement of uavs as communication relays aiding mobile ad hoc wireless networks," in *MILCOM 2007 - IEEE Military Communications Conference*, pp. 1–7, Oct 2007.
- [33] N. Correll, J. Bachrach, D. Vickery, and D. Rus, "Ad-hoc wireless network coverage with networked robots that cannot localize," in *Proc. IEEE ICRA*, 2009.
- [34] N. Goddemeier, S. Rohde, J. Pojda, and C. Wietfeld, "Evaluation of potential fields mobility strategies for aerial network provisioning," in *2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, pp. 1291–1296, Dec 2011.
- [35] G. Martins, M. J. Rutherford, and K. P. Valavanis, "Search methodologies for node recovery in robotic swarms," in *Control Automation (MED), 2011 19th Mediterranean Conference on*, pp. 157–162, June 2011.
- [36] K. Chandrashekar, M. R. Dekhordi, and J. S. Baras, "Providing full connectivity in large ad-hoc networks by dynamic placement of aerial platforms," in *IEEE MILCOM 2004. Military Communications Conference, 2004.*, vol. 3, pp. 1429–1436 Vol. 3, Oct 2004.
- [37] S. Rohde, M. Putzke, and C. Wietfeld, "Ad hoc self-healing of {OFDMA} networks using uav-based relays," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 7, pp. 1893 – 1906, 2013. Theory, Algorithms and Applications of Wireless Networked RoboticsRecent Advances in Vehicular Communications and Networking.
- [38] D. Halperin, W. Hu, A. Sheth, and D. Wetherall, "Predictable 802.11 packet delivery from wireless channel measurements," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 40, pp. 159–170, Aug. 2010.
- [39] V. Sevani and B. Raman, "Sir based interference modeling for wireless mesh networks: A detailed measurement study," in *2012 Fourth International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS 2012)*, pp. 1–10, Jan 2012.
- [40] S. M. Kala, M. P. K. Reddy, and B. R. Tamma, "Predicting performance of channel assignments in wireless mesh networks through statistical interference estimation," in *Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), 2015 IEEE International Conference on*, pp. 1–6, July 2015.
- [41] M. Burkhart, P. Von Rickenbach, R. Wattenhofer, and A. Zollinger, "Does topology control reduce interference?," in *Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pp. 9–19, ACM, 2004.

- [42] P. V. Rickenbach, S. Schmid, R. Wattenhofer, and A. Zollinger, "A robust interference model for wireless ad-hoc networks," in *In Proc. 5 th IEEE International Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad-Hoc and Sensor Networks (WMAN)*, 2005.
- [43] M. Killat and H. Hartenstein, "An empirical model for probability of packet reception in vehicular ad hoc networks," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2009, pp. 4:1–4:12, Jan. 2009.
- [44] K. Moaveni-Nejad and X.-Y. Li, "Low-interference topology control for wireless ad hoc networks," *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, vol. 1, no. 1-2, pp. 41–64, 2005.
- [45] L. Irio and R. Oliveira, "Interference estimation in wireless mobile random waypoint networks," in *2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, pp. 161–164, Nov 2015.
- [46] A. S. Tanenbaum, *Computer Networks*. Prentice Hall PTR, 2003.
- [47] B. Fateh and M. Govindarasu, "Joint scheduling of tasks and messages for energy minimization in interference-aware real-time sensor networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 14, pp. 86–98, Jan 2015.
- [48] J. S. Seybold, *Introduction to RF propagation*. John Wiley & Sons, 2005.
- [49] K. V. Kevin Fall, "The ns manual (formerly ns notes and documentation)," November 2011.
- [50] A. Umar, *Mobile Computing and Wireless Communications*. NGE solutions, 2004.
- [51] H. T. Friis, "A note on a simple transmission formula," *Proceedings of the IRE*, vol. 34, pp. 254–256, May 1946.
- [52] IBM, *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio CPLEXUser's Manual*.
- [53] L. De Giovanni and C. E. Palazzi, "Optimal client-server configuration of mobile ad-hoc networks," *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, no. 41, pp. 495–502, 2013.