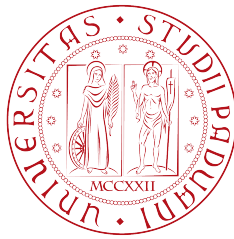


Algoritmi basati su programmazione matematica per la configurazione di reti ad-hoc di droni



Filippo Gamberoni

Supervisor: Luigi De Giovanni

Dipartimento di Matematica
Università degli Studi di Padova

This dissertation is submitted for the degree of
Laurea Magistrale in Informatica

November 2016

I would like to dedicate this thesis to my loving parents ...

Declaration

I hereby declare that except where specific reference is made to the work of others, the contents of this dissertation are original and have not been submitted in whole or in part for consideration for any other degree or qualification in this, or any other university. This dissertation is my own work and contains nothing which is the outcome of work done in collaboration with others, except as specified in the text and Acknowledgements. This dissertation contains fewer than 65,000 words including appendices, bibliography, footnotes, tables and equations and has fewer than 150 figures.

Filippo Gamberoni
November 2016

Acknowledgements

And I would like to acknowledge ...

Abstract

This is where you write your abstract ...

Indice

Elenco delle figure	xiii
Elenco delle tabelle	xv
1 Introduzione	1
1.1 What is loren ipsum? Title with math σ	1
1.2 Why do we use loren ipsum?	1
1.3 Where does it come from?	1
2 Contesto tecnologico	3
2.1 Introduzione al drone	3
2.1.1 Cenni storici	3
2.1.2 Ambiti d'uso	4
2.1.3 Tassonomia	4
2.1.4 Struttura	6
2.1.5 Autonomia di volo	7
2.2 Reti ad-hoc	8
2.2.1 Protocolli di routing	9
2.3 Reti FANET	10
2.3.1 Routing nelle FANET	12
3 My third chapter	13
Bibliografia	15
Appendice A How to install L^AT_EX	17
Appendice B Installing the CUED class file	19

Elenco delle figure

Elenco delle tabelle

3.1	A badly formatted table	13
3.2	A nice looking table	14
3.3	Even better looking table using booktabs	14

Capitolo 1

Introduzione

1.1 What is loren ipsum? Title with math σ

1.2 Why do we use loren ipsum?

1.3 Where does it come from?

Capitolo 2

Contesto tecnologico

2.1 Introduzione al drone

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), 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.

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", 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 im-

piegati 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 [1].

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, contro il bracconaggio e per combattere incendi. [2]

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:
 - 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.
- Struttura:
 - 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.

2.1.4 Struttura

La struttura di un drone è generalmente ricorrente, e può essere schematizzata nelle seguenti componenti [?]:

- 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;
- 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 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. I risultati migliori, seppur ancora lontani dall'autonomia energetica, sono stati ottenuti sui droni ad ala fissa [3] ricoprendo le ali di pannelli, mentre sui quadricotteri l'ingombro dell'attrezzatura aggiuntiva causava un effetto vela che riduceva la stabilità in volo [4].

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 [5], mentre Facebook sta attivamente testando l'uso di droni solari per fornire connettività a internet ai Paesi del Terzo Mondo con il progetto Aquila [6].

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 (Access Point, router, switch, etc.), in quanto sono gli stessi nodi a occuparsene, agendo come router.

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.

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.

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. [?]

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. [? ?]

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 (Highly Dynamic 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) [? ?].

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).

2.3 Reti FANET

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

Le reti FANET sono reti ad-hoc tra droni, ancora in fase sperimentale, e possono essere viste come un sottoinsieme delle VANET, 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, 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 multihop, 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 UAVs, e quindi una diversa frequenza di variazione della topologia. Gli stessi droni possono viaggiare a velocità diversa, guastarsi o allontanarsi per effettuare una ricarica, 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.

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;
- **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

My third chapter

Tabella 3.1 A badly formatted table

Dental measurement	Species I		Species II	
	mean	SD	mean	SD
I1MD	6.23	0.91	5.2	0.7
I1LL	7.48	0.56	8.7	0.71
I2MD	3.99	0.63	4.22	0.54
I2LL	6.81	0.02	6.66	0.01
CMD	13.47	0.09	10.55	0.05
CBL	11.88	0.05	13.11	0.04

Tabella 3.2 A nice looking table

Dental measurement	Species I		Species II	
	mean	SD	mean	SD
I1MD	6.23	0.91	5.2	0.7
I1LL	7.48	0.56	8.7	0.71
I2MD	3.99	0.63	4.22	0.54
I2LL	6.81	0.02	6.66	0.01
CMD	13.47	0.09	10.55	0.05
CBL	11.88	0.05	13.11	0.04

Tabella 3.3 Even better looking table using booktabs

Dental measurement	Species I		Species II	
	mean	SD	mean	SD
I1MD	6.23	0.91	5.2	0.7
I1LL	7.48	0.56	8.7	0.71
I2MD	3.99	0.63	4.22	0.54
I2LL	6.81	0.02	6.66	0.01
CMD	13.47	0.09	10.55	0.05
CBL	11.88	0.05	13.11	0.04

Bibliografia

- [1] 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.
- [2] J. Githens, “Civilian applications of a drone, uav, uas or uvs.”
- [3] D. Quick, “Solar-powered puma ae small uas stays aloft for over nine hours.”
- [4] D. Lukonis, “Solar drone experiments - how much more battery life do you get by adding solar panels to your quad?.”
- [5] D. Carrington, “Solar impulse 2 completes first ever atlantic crossing by solar plane.”
- [6] M. Zuckerberg, “The technology behind aquila.”

Appendice A

How to install L^AT_EX

Appendice B

Installing the CUED class file

