



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



**DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA INFORMATICA

Autenticazione con challenge-response per droni: analisi energetica e di sicurezza

LAUREANDO:

Eduardo David Lotto

Matricola: 2016263

RELATORE:

Prof. Stefano Tomasin

ANNO ACCADEMICO
2022/2023

Abstract

I droni sono sempre più utilizzati in diversi settori, tra cui le telecomunicazioni. In particolare assumono un ruolo importante nelle Non-Terrestrial Networks, in quanto possono essere un mezzo per ottenere trasmissioni d'informazioni ad alta velocità. Questa tesi esplora alcuni aspetti di questo veicolo. Inizialmente se ne analizzano i consumi energetici e successivamente, dopo aver presentato un modello di canale ad onde millimetriche in cui il drone comunica con diversi utenti a terra, se ne indaga la sicurezza. Finalmente, attraverso un modello di autenticazione challenge-response basato sulla posizione del drone, si studia come il drone può essere attaccato e come varia la sicurezza in base ai movimenti che compie e, quindi, all'energia che consuma.

Indice

Lista delle Immagini	xi
Lista delle Tabelle	xiii
Lista degli Acronimi	xix
1 Non-Terrestrial Networks e droni	3
1.1 Reti cellulari di sesta generazione	3
1.2 Le Non-Terrestrial Networks	4
1.3 I droni	5
1.4 L'autenticazione	6
2 Analisi energetica	9
2.1 Modello fisico	9
2.2 Modello empirico	11
2.2.1 Volo stazionario	12
2.2.2 Volo orizzontale	12
2.2.3 Volo verticale	13
2.3 Confronto tra i due modelli	13
2.3.1 Primo caso: volo orizzontale	14
2.3.2 Secondo caso: volo verticale	14
2.3.3 Terzo caso: volo stazionario	15
2.3.4 Consumo di energia a velocità maggiori	16
2.4 Focus sull'hovering	17
3 Droni e sicurezza	19
3.1 Modello di sistema	19
3.2 Autenticazione challenge-response	23
3.3 Probabilità di false alarm e di miss detection	24

INDICE

4	Consumi energetici e sicurezza	29
4.1	Analisi bidimensionale	29
4.2	Analisi tridimensionale	32
5	Conclusioni	37
	Bibliografia	39
	Ringraziamenti	41

Lista delle Immagini

1.1	Illustrazione dei vari tipi di veicoli in una NTN [6]	5
1.2	Esempi di diversi utilizzi di un UAV [7]	6
2.1	Parrot AR Drone 2.0 [12]	11
2.2	Intel Aero Ready To Fly [14]	12
3.1	Schema della rete [17]	20
3.2	Schema della distanza tra User Equipment (UE) e Drone Base Station (DBS)	21
3.3	Plot del SNR in caso di LoS	22
3.4	Plot del SNR in caso di NLoS	23
3.5	Illustrazione di L_s e l_s	25
3.6	Plot di P_{md} in funzione di P_{ma}	27
3.7	Plot di $f_d(y)$	28
4.1	Illustrazione dell'analisi bidimensionale dall'alto	30
4.2	Plot di P_{md} in funzione di E_m nell'analisi bidimensionale	32
4.3	Illustrazione dell'analisi tridimensionale	33
4.4	Prima soluzione per il calcolo dei consumi nell'analisi tridimensionale .	34
4.5	Plot del primo caso dell'analisi tridimensionale	36
4.6	Plot del secondo caso dell'analisi tridimensionale	36

Lista delle Tabelle

2.1	Caratteristiche fisiche del drone Intel Aero Ready To Fly	11
2.2	Parametri per il calcolo dell'energia attraverso il modello fisico	14
2.3	Primo caso: energia consumata in volo orizzontale	14
2.4	Secondo caso: energia consumata in volo verticale verso l'alto	15
2.5	Secondo caso: energia consumata in volo verticale verso il basso	15
2.6	Terzo caso: potenza consumata in volo stazionario	16
2.7	Quarto caso: relazione tra energia e velocità del drone	16
3.1	Parametri dei grafici del SNR	22
4.1	Risultati dell'analisi bidimensionale	31
4.2	Risultati dell'analisi tridimensionale	35

Lista degli Acronimi

CR	Challenge-Response
DBS	Drone Base Station
FANETs	Flying Ad-hoc Networks
GEO	Geostationary Earth Orbit
HAPs	High Altitude Platforms
LEO	Low Earth Orbit
LoS	Line of Sight
MEO	Medium Earth Orbit
NLoS	Not-Line of Sight
NTNs	Non-Terrestrial Networks
PLS	Physical-Layer Security
QoS	Quality of Service
SNR	Signal to Noise Ratio
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UE	User Equipment
ULA	Uniform Linear Array

Introduzione

La tecnologia dei droni è in rapido sviluppo e in continuo cambiamento. Questi strumenti sono sempre più diffusi, non solo tra gli appassionati ma anche in diversi settori tecnologici e industriali.

Un'interessante applicazione è nel campo delle telecomunicazioni, specificatamente nelle Non-Terrestrial Networks in cui i droni potranno in futuro coprire un ruolo importante grazie alla loro manovrabilità e alla loro polivalenza.

Questa tesi, che si divide in quattro capitoli, va a toccare due particolari aspetti dei droni, ossia l'efficienza energetica e la sicurezza.

Nel primo capitolo viene introdotto il concetto di Non-Terrestrial Network, gli elementi che la compongono e perchè è importante per le reti di futura generazione. Si presenta anche il ruolo che possono avere i droni e i loro vantaggi. Viene infine esposto un breve excursus sul concetto di autenticazione.

Nel secondo capitolo si esegue un'analisi energetica mediante l'utilizzo di un modello fisico e di uno empirico, entrambi presenti nella bibliografia. Attraverso questi ultimi si calcola l'energia spesa da un drone che compie certi movimenti al variare della distanza percorsa e della velocità.

Nel terzo capitolo viene presentato il modello di una rete aerea formata da un drone e dalla trasmissione di onde millimetriche. Successivamente si descrive l'autenticazione challenge-response, in particolare un certo meccanismo basato sul Physical-Layer Security. Si realizza in seguito l'analisi di sicurezza con il calcolo della probabilità di false alarm e di miss detection, attraverso un sistema basato sul valore atteso del rapporto segnale-rumore.

Nel quarto capitolo si uniscono gli argomenti dei due precedenti. Nello specifico, si calcola la relazione tra la probabilità di miss detection e l'energia spesa mediamente dal drone per compiere un certo numero di movimenti. Prima ne viene realizzata un'analisi bidimensionale in cui il drone si muove solo nel piano orizzontale, infine un'analisi tridimensionale in cui sono consentite tutte le direzioni di movimento.



Non-Terrestrial Networks e droni

Per comprendere meglio lo studio di questa tesi bisogna innanzitutto capire perchè le reti di nuova generazione hanno bisogno delle Non-Terrestrial Networks (NTNs) e che ruolo possono avere i droni al loro interno.

1.1 RETI CELLULARI DI SESTA GENERAZIONE

La rete cellulare di quinta generazione (5G) è ormai diffusa e la sua implementazione si sta propagando lungo tutto il pianeta. Si prevede però che entro il 2030 il traffico mobile globale sarà pari a 670 volte quello del 2010 e ciò porterebbe il 5G a raggiungere i propri limiti [1]. In particolare, questa rete utilizza un range di onde millimetriche tra i 20 e i 100 GHz ma in futuro saranno necessarie frequenze superiori, anche pari a qualche THz, in modo da ottenere tassi di trasferimento dei dati di oltre 1 Tbps, rispetto ai 20 Gbps del 5G. Proprio per questo motivo la ricerca sta già discutendo riguardo i casi d'uso, i requisiti e le tecnologie dei sistemi di sesta generazione (6G). Attraverso quest'ultima si cerca di fornire una connettività massiccia a milioni di dispositivi interconnessi con diversi requisiti di Quality of Service (QoS), una copertura completa, un alto grado di incorporazione di intelligenza artificiale, un uso efficiente dell'energia e una sicurezza di rete adattiva [2].

Tra le varie sfide da affrontare, la rete attuale non è efficace nel fornire un'adeguata copertura a banda larga nelle regioni rurali [3]. Inoltre anche nelle zone più avanzate tecnologicamente, le infrastrutture attuali potrebbero non disporre del livello di affidabilità, disponibilità e capacità di risposta richiesto dalle future applicazioni wireless, ed essere vulnerabili ai disastri naturali. In quest'ultimo caso è essenziale che la connettività non si interrompa in modo da riuscire a limitare il numero di morti e i danni

alle proprietà o alle attività [4].

In questo senso però aumentare le stazioni base come le celle radio è un'operazione proibitiva in zone rurali, così come l'installazione di cavi o fibre. Per questo motivo la ricerca riguardo il 6G si sta concentrando sullo studio delle NTN.

1.2 LE NON-TERRESTRIAL NETWORKS

Le NTN sono reti che operano attraverso l'impiego di veicoli aerei e/o spaziali. Sono di particolare interesse perchè possono potenzialmente fornire servizi ovunque e in qualunque momento, arrivando a coprire zone che sono irraggiungibili dalle tradizionali reti terrestri.

Come riportato in [4], le scorse generazioni di rete sono state progettate per fornire connettività in uno spazio quasi bi-dimensionale, mentre il 6G, attraverso le NTN, prevede un'architettura tridimensionale in cui le infrastrutture terrestri sono integrate con strutture non terrestri.

Le NTN sono basicamente composte dai seguenti elementi:

- Un terminale terrestre;
- Una stazione aerea o spaziale che opera in modo simile a una stazione base terrestre;
- Un collegamento tra il terminale terrestre e la stazione aerea/spaziale;
- Un gateway che collega la rete di accesso non terrestre alla rete centrale.

I diversi tipi di veicoli utilizzabili nelle NTN sono Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), High Altitude Platforms (HAPs) e satelliti [5]. Ogni genere differente di mezzo corrisponde a diverse altezze di volo e, di conseguenza, crescenti raggi di copertura a livello terrestre. Generalmente un Unmanned Aerial Vehicle (UAV) opera a basse altitudini, tipicamente qualche centinaia di metri al massimo, mentre gli HAPs volano nella stratosfera tra i 17 e i 22 km dal suolo. I satelliti invece si dividono in tre categorie:

- Low Earth Orbit (LEO), che orbitano tra i 600 e i 1500 km;
- Medium Earth Orbit (MEO), che orbitano tra i 7000 e i 35000 km;
- Geostationary Earth Orbit (GEO), che orbitano intorno ai 35800 km. Generano segnali che giungono parecchio attenuati a terra e con maggior ritardo ma possono coprire aree molto ampie. Oltre a ciò, essendo non stazionari rispetto alla superficie della Terra devono operare in una costellazione per garantire la continuità del servizio.

Nella Figura 1.1 sono illustrate le varie tipologie di veicoli impiegabili nelle NTN.

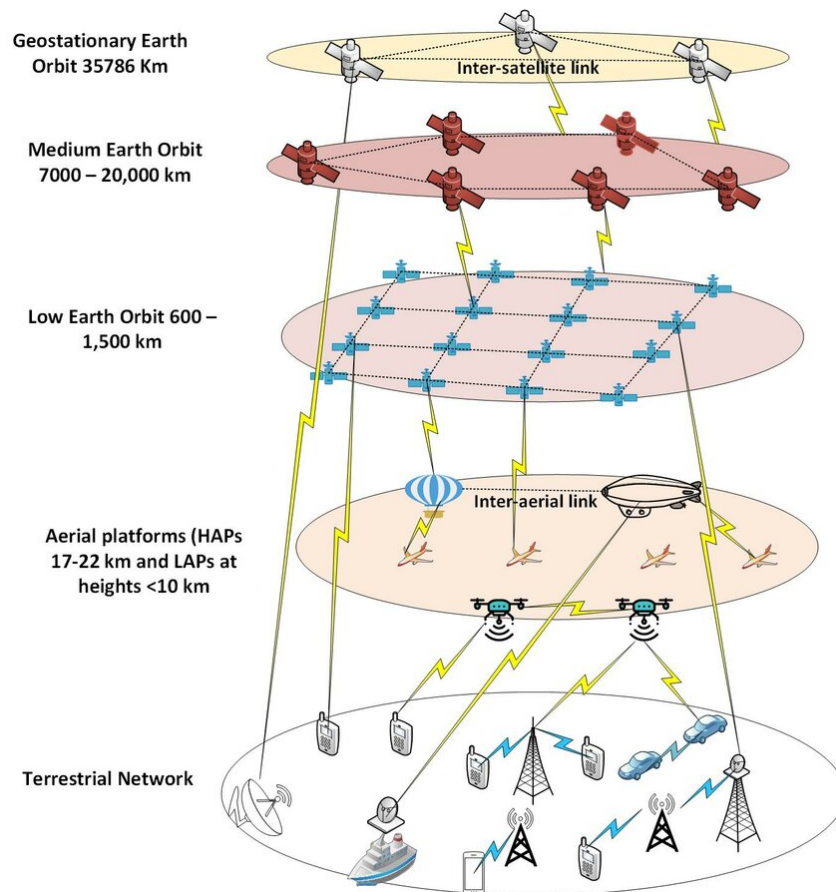


Figura 1.1: Illustrazione dei vari tipi di veicoli in una NTN [6]

1.3 I DRONI

Tra i differenti veicoli elencati, si approfondisce ora il possibile utilizzo dei droni nelle NTN con i relativi vantaggi, in quanto sono i dispositivi su cui si sviluppa la presente tesi.

Negli ultimi decenni gli UAVs hanno suscitato un interesse sempre maggiore sia di tipo accademico che industriale. Infatti, come si può osservare in Figura 1.2, sono dispositivi utilizzabili per un'infinità di scopi diversi come, ad esempio, la sorveglianza del traffico, la valutazione dell'inquinamento dell'aria, le spedizioni, la ricerca in operazioni di salvataggio e soprattutto l'erogazione di connettività wireless.

Ci si potrebbe chiedere perchè nella ricerca riguardo le NTN si investa tempo e denaro sui droni nonostante la presenza nello spazio di mezzi come i satelliti. Come descritto in [8], la mobilità dei satelliti è unidirezionale e incontrollabile. Inoltre, i canali ground-to-space con segnali ad elevata frequenza sono spesso sensibili alla Line of Sight (LoS), cosa non sempre conseguibile a queste distanze. Infine, i segnali generati possono giungere a terra con un'attenuazione e un ritardo non trascurabili. Per questi motivi

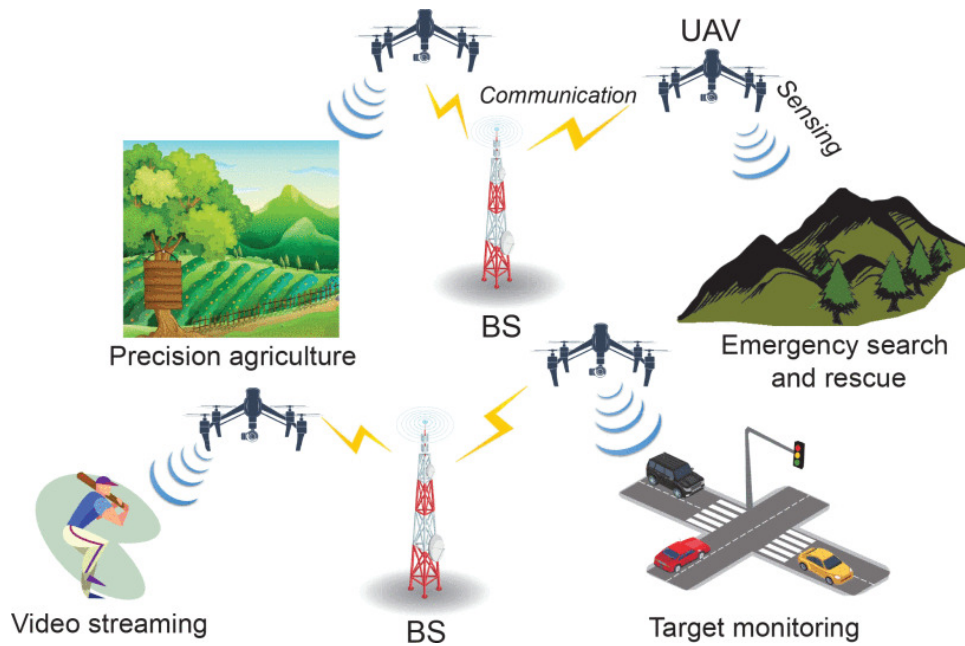


Figura 1.2: Esempi di diversi utilizzi di un UAV [7]

i droni possono giocare un ruolo cruciale nelle NTN, essendo leggeri e manovrabili velocemente in ogni direzione. Possono garantire molta più efficienza nella comunicazione e complessivamente forniscono più libertà nella progettazione della rete, dato che possono essere usati in una grande varietà di impostazioni diverse, come stazioni base aeree, punti di accesso, ripetitori, o terminali mobili. In aggiunta, gli UAVs possono fornire dei buffer volanti per migliorare il throughput end-to-end e la latenza delle comunicazioni tra i satelliti e la terra [9].

La ricerca sta studiando l'impiego di sciame di droni, piuttosto che di un singolo UAV, in modo che formino delle Flying Ad-hoc Networks (FANETs). Infatti un sistema multi-UAV offre più affidabilità attraverso la ridondanza, in modo tale che se un drone dovesse cessare di funzionare o incontrare qualche problema non comprometterebbe l'intero sciame.

Di pari passo a quanto descritto, si stanno anche studiando metodi efficaci di autenticazione, di interesse di questa tesi, in modo che la connessione tra i droni e gli utenti a terra sia sicura.

1.4 L'AUTENTICAZIONE

L'autenticazione si può definire come la determinazione, da parte del ricevitore autorizzato, che un certo messaggio sia stato inviato dal trasmettitore autorizzato seguendo il protocollo di autenticazione stabilito. L'autenticazione delle informazioni è

essenziale per ogni entità che partecipa ad una comunicazione, in modo che i messaggi scambiati rimangano privati e inaccessibili.

L'obiettivo principale della progettazione di un protocollo di autenticazione è quindi quello di fare in modo che l'attaccante non riesca in alcun modo a impersonarsi nel trasmettitore autorizzato, sostituendo messaggi fraudolenti a quelli originali.

Normalmente gli schemi di autenticazione includono operazioni di crittografia e decrittazione eseguite dal trasmettitore e dal ricevitore secondo una chiave crittografica che conoscono solo loro.

In questa tesi si approfondisce un particolare tipo di autenticazione Challenge-Response (CR), analizzata nel capitolo 3.

2

Analisi energetica

Si procede ad analizzare, in questo capitolo, il consumo di energia dei droni in base ai loro movimenti, alla distanza percorsa e alla loro velocità. Prima di tutto, si riportano due modelli di consumo energetico dei droni, uno fisico e uno empirico. In seguito, si confrontano attraverso un codice Python appositamente creato.

2.1 MODELLO FISICO

Attraverso il modello presente in [10], il consumo energetico dei droni viene descritto da alcune formule che descrivono la fisica del drone.

Ci sono tre forze principali che coinvolgono il drone nei suoi movimenti:

- F_W : la forza peso del drone;
- F_{DH} : la forza d'attrito orizzontale;
- F_{DV} : la forza d'attrito verticale.

F_{DH} e F_{DV} si oppongono al movimento del drone e sono prodotte dalla perturbazione dell'aria causata da esso. Pertanto, l'UAV, attraverso la rotazione delle eliche, deve generare una forza F_T che bilanci le altre forze in gioco e che gli permetta di muoversi. Le tre forze sopracitate sono modellate così:

$$F_W = m_d \cdot g, \quad (2.1)$$

$$F_{DH} = \frac{1}{2} \rho A_f C_d v_h^2, \quad (2.2)$$

2.1. MODELLO FISICO

$$F_{DH} = \frac{1}{2}\rho A_t C_d v_v^2, \quad (2.3)$$

dove m_d è la massa del drone, g è l'accelerazione gravitazionale, A_f e A_t sono le aree delle sezioni trasversali rispettivamente in orizzontale e in verticale del drone, C_d è il coefficiente di resistenza aerodinamica e ρ è la densità dell'aria. Le $F_{T,h}$ e $F_{T,v}$ richieste sono quindi:

$$F_{T,h} = \sqrt{F_W^2 + F_{DH}^2} \quad (2.4)$$

$$F_{T,v} = F_W + F_{DV}. \quad (2.5)$$

Per calcolare F_T si può utilizzare la velocità del flusso d'aria indotto dal movimento delle eliche v_i e l'area circolare delle eliche A_p come segue:

$$F_T = 2\rho A_p v_i^2. \quad (2.6)$$

Utilizzandola si potrebbe poi calcolare la potenza e successivamente l'energia. Tuttavia la potenza consumata effettivamente dai motori è diversa a causa della velocità angolare del motore e del momento torcente. Più grande è il valore della velocità angolare del motore, più aria passa tra le eliche a parità di tempo e, perciò, la spinta generata è maggiore, quindi si ha:

$$F_T = \frac{1}{2}B\rho A_p C_t (wr)^2, \quad (2.7)$$

dove B è il numero di rotori, C_t è un coefficiente d'attrito, w è la velocità angolare e r il raggio delle eliche.

Si può quindi ricavare la velocità angolare necessaria al drone per muoversi ad una velocità costante orizzontale v_h e verticale v_v :

$$w_h = \frac{(4m_d^2 g^2 + \rho^2 A_f^2 C_d^2 v_h^4)^{\frac{1}{4}}}{(r^2 \rho A_p C_t)^{\frac{1}{2}}}, \quad (2.8)$$

$$w_v = \frac{(2m_d g + \rho A_t C_d v_v^2)^{\frac{1}{2}}}{(r^2 \rho A_p C_t)^{\frac{1}{2}}}. \quad (2.9)$$

Facendo riferimento ai dati sperimentali di [11] riguardo la corrente, il voltaggio e la velocità angolare del Parrot AR Drone 2.0, in Figura 2.1, si ricava la potenza in funzione della velocità angolare:

$$P = 2.258 \cdot 10^{-7} w^3 + 3.866 \cdot 10^{-5} w^2 + 5.137 \cdot 10^{-3} w + 2.616. \quad (2.10)$$



Figura 2.1: Parrot AR Drone 2.0 [12]

Infine, l'energia è:

$$E = \int P dt = P \cdot t = P \frac{d}{v}, \quad (2.11)$$

in cui d è la distanza percorsa dal drone e v la sua velocità (orizzontale o verticale).

2.2 MODELLO EMPIRICO

Gli esperimenti realizzati in [13] permettono di avere un modello empirico di consumo energetico del drone Intel Aero Ready To Fly, le cui caratteristiche fisiche sono elencate nella Tabella 2.1. Le prove vengono eseguite in ambiente esterno, senza ostacoli e con vento minimo. Si riportano solo le formule che interessano i casi di studio di questa tesi, ovvero quelle relative ai consumi di energia durante i movimenti orizzontali, verticali e in volo stazionario (o hovering).

Tabella 2.1: Caratteristiche fisiche del drone Intel Aero Ready To Fly

Specifica	Valore
Peso	865g
Lunghezza diagonale	360mm
Altezza	222mm
Dimensione eliche	230mm



Figura 2.2: Intel Aero Ready To Fly [14]

2.2.1 VOLO STAZIONARIO

Il drone viene fatto volare in modo stazionario ad altezze diverse per capire l'andamento del consumo di energia e l'impatto che l'altezza ha su di esso.

Il consumo medio rimane ragionevolmente stabile lungo il periodo di volo. Infatti, il drone si trova in una situazione statica e le forze che agiscono su di esso sono idealmente bilanciate e rimangono stabili in caso di condizioni ambientali perfette. Le forze generate dalla rotazione delle eliche rimangono stabili nel tempo e il risultato è un consumo energetico stabile.

L'altitudine cui si trova l'UAV influisce sui consumi. Anche se l'altezza non ha influenza sulla forza peso del drone, all'aumentare di questa cambiano le condizioni climatiche e il drone, per mantenersi stabile in volo, consuma più energia.

La formula ricavata dagli esperimenti è:

$$E = (4.917h + 275.204)t. \quad (2.12)$$

2.2.2 VOLO ORIZZONTALE

Il drone viene fatto volare orizzontalmente in linea retta a 5 metri da terra e alla velocità $v_h = 1$ m/s. I risultati mostrano che il consumo medio rimane costante lungo tutto il periodo, facendo eccezione per alcune fluttuazioni causate da qualche movimento verticale del drone.

Il consumo medio stabile è dato dal fatto che il drone sta volando a velocità costante, perciò le forze agenti si dovrebbero teoricamente bilanciare. Quindi la forza creata

dall'UAV dovrebbe essere pari alla forza risultante agente sul drone. In condizioni ambientali perfette, le forze agenti dovrebbero rimanere costanti e, di conseguenza, anche la forza generata dal drone, il cui consumo di potenza dovrebbe rimanere costante. L'energia consumata nel tempo è:

$$E = 308.709d - 0.852. \quad (2.13)$$

2.2.3 VOLO VERTICALE

L'UAV è stato fatto decollare per raggiungere diverse altezze verticalmente con una velocità $v_v = 1$ m/s. All'inizio del volo, il consumo cresce in modo costante e rimane ragionevolmente stabile finché il drone non raggiunge l'altezza prefissata. Con distanze più grandi, si possono osservare incrementi casuali del consumo dovuti alle reazioni del drone al cambiamento delle condizioni ambientali. La relazione tra consumo energetico e distanza percorsa verticalmente è:

$$E = 315d - 211.261. \quad (2.14)$$

Successivamente, viene fatta la stessa prova ma in volo verticale verso il basso, ottenendo:

$$E = 68.956d - 65.183. \quad (2.15)$$

Rispetto alla prova di volo verso l'alto, si nota che in questo caso l'energia richiesta è considerevolmente minore, a causa dell'azione della forza gravitazionale.

2.3 CONFRONTO TRA I DUE MODELLI

Si procede ora a confrontare i due modelli per capirne la differenza. Attraverso un codice Python che descrive le formule dei modelli e che contiene tutti i parametri necessari, si calcola l'energia consumata dai due droni per certi movimenti. Nel modello empirico il drone utilizzato è l'Intel Aero Ready To Fly, mentre in quello fisico è il Parrot AR Drone 2.0, per cui sono stati utilizzati i loro dati per i rispettivi modelli.

I parametri inseriti nel codice sono riportati nella Tabella 2.2. Tra essi è presente C_t , ovvero il coefficiente d'attrito della (2.7), con un valore che varia tra 0.01 e 0.05 [15] e di cui è stato preso il valore medio. C_{dv} e C_{dh} sono rispettivamente i coefficienti di resistenza aerodinamica di un cubo (per il volo verticale) e di un cubo inclinato (per il volo orizzontale). Infine, m_d , p_r , s_d e h_{dr} sono rispettivamente la massa del Parrot, il raggio delle sue eliche, la dimensione laterale e la sua altezza.

2.3. CONFRONTO TRA I DUE MODELLI

Tabella 2.2: Parametri per il calcolo dell'energia attraverso il modello fisico

Parametro	Valore
C_t	0.03
C_{dv}	1.05
C_{dh}	0.8
ρ	1.225 kg/m ³
m_d	0.420 kg
p_r	0.115 m
s_d	0.517 m
h_{dr}	0.110 m

Attraverso il codice, si realizzano dei casi di confronto tra i due modelli, in cui bisogna tenere in considerazione le diverse specifiche tra i due droni. Dato che il modello empirico considera solo velocità pari a 1 m/s, il confronto si basa su situazioni diverse ma utilizzando questa velocità anche nel modello fisico.

2.3.1 PRIMO CASO: VOLO ORIZZONTALE

Prima di tutto, si confrontano i consumi dei due modelli nel caso di volo orizzontale facendo percorrere ai due droni distanze crescenti, ovvero 20 m, 40 m, 80 m, 160 m. I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 2.3.

Si può notare come, in entrambi i casi, il consumo di energia sia direttamente propor-

Tabella 2.3: Primo caso: energia consumata in volo orizzontale

Distanza percorsa	Modello empirico	Modello fisico
20 metri	115.87 mAh	40.13 mAh
40 metri	231.75 mAh	80.26 mAh
80 metri	463.51 mAh	160.52 mAh
160 metri	927.01 mAh	321.04 mAh

zionale alla distanza percorsa. In particolare, raddoppiando la lunghezza del percorso si raddoppia anche l'energia utilizzata. Si osserva anche che nel modello empirico il valore di energia consumata è maggiore di quella nel modello fisico. Infatti, c'è una variazione percentuale costante del 189% tra i due modelli: un aumento significativo, anche prendendo in considerazione le differenze fisiche tra i due droni.

2.3.2 SECONDO CASO: VOLO VERTICALE

Si analizzano ora i consumi di energia durante i movimenti verticali, distinguendo tra volo verso l'alto e volo verso il basso. Le distanze considerate in questo caso sono

Tabella 2.4: Secondo caso: energia consumata in volo verticale verso l'alto

Distanza percorsa	Modello empirico	Modello fisico
5 metri	25.60 mAh	10.59 mAh
10 metri	55.16 mAh	21.17 mAh
20 metri	114.28 mAh	42.34 mAh
40 metri	232.52 mAh	84.69 mAh

Tabella 2.5: Secondo caso: energia consumata in volo verticale verso il basso

Distanza percorsa	Modello empirico	Modello fisico
5 metri	5.25 mAh	10.59 mAh
10 metri	11.72 mAh	21.17 mAh
20 metri	24.66 mAh	42.34 mAh
40 metri	50.54 mAh	84.69 mAh

5 m, 10 m, 20 m, 40 m e i risultati ottenuti sono riportati nelle Tabelle 2.4 e 2.5. Dalla Tabella 2.4 si nota che, nel modello empirico, il valore di energia utilizzata volando verso l'alto è più grande rispetto a quella nel modello fisico. Non è presente una variazione percentuale costante, bensì varia da 142% per la distanza più breve, a 175% per l'ultima distanza.

Diversa è la situazione nella Tabella 2.5. I consumi nel modello fisico rimangono invariati poichè la formula è unica per entrambe le dinamiche considerate. Invece, il modello empirico divide le due situazioni con formule distinte ovvero la (2.14) e la (2.15), pertanto l'energia consumata volando verticalmente verso il basso è circa 1/5 di quella consumata volando verso l'alto. Di conseguenza, l'energia consumata è minore rispetto a quella calcolata attraverso il modello fisico, con una variazione percentuale che va dal 102% al 68%.

2.3.3 TERZO CASO: VOLO STAZIONARIO

Si confrontano ora i consumi di energia nel caso di volo stazionario. Bisogna ricordare che, nel modello empirico, la formula dell'energia utilizzata in caso di hovering dipende dal tempo e dall'altezza cui si trova il drone. Invece, nel modello fisico, si ottiene ponendo in (2.9) la velocità verticale pari a zero, per ottenere la velocità angolare del motore w_v , da cui ricavare la potenza attraverso la (2.10) e moltiplicando infine per il tempo. Si ottiene, quindi, che l'energia non dipende dall'altezza bensì dal peso del drone, dalla sua forza di spinta e dal tempo, che è l'unica variabile.

Per facilitare il confronto, invece di analizzare i consumi di energia realizzo un paragone tra i consumi di potenza. In altre parole, si elimina in entrambi i casi la moltiplicazione per il tempo di hovering.

Tabella 2.6: Terzo caso: potenza consumata in volo stazionario

Altezza	Modello empirico	Modello fisico
50 metri	0.52 kW	0.08 kW
100 metri	0.77 kW	0.08 kW
150 metri	1.01 kW	0.08 kW
200 metri	1.26 kW	0.08 kW

Si analizzano il volo stazionario ad altezze crescenti, in particolare 50 m, 100 m, 150 m e 200 m. I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 2.6.

Ovviamente, la potenza consumata nel modello fisico è costante in quanto non dipende dall'altezza. D'altro canto, nel modello empirico il consumo di potenza aumenta all'incrementare dell'altezza perchè, come già dichiarato, cambiano le condizioni climatiche e il drone deve mantenere la stabilità. Si può infine considerare come, anche in questo paragone, i consumi nel modello fisico siano ben minori che nel modello empirico.

2.3.4 CONSUMO DI ENERGIA A VELOCITÀ MAGGIORI

Dato che il modello empirico considera solo velocità pari a 1 m/s, si realizza un altro caso di studio a velocità superiori attraverso l'utilizzo del modello fisico.

Fissata arbitrariamente una distanza (50 m), si studia la relazione tra consumo di energia e velocità del drone sia per il volo orizzontale che per quello verticale. I risultati sono riportati nella Tabella 2.7.

Si considera inizialmente il volo orizzontale. Al contrario di quanto si possa pensare, l'energia consumata diminuisce proporzionalmente all'aumentare della velocità. Ciò avviene perchè, aumentando la velocità del drone, diminuisce il tempo impiegato a percorrere i 50 metri prefissati. Dividendo i valori di energia consumata per il rispettivo tempo, cioè 50 s, 25 s, 12.5 s e 6.25 s, si ottiene che nei primi tre casi si ha un consumo al secondo pari a circa 2 mAh/s, mentre nell'ultimo pari a 2.25 mAh/s. Ciò è dovuto alla (2.8) da cui si ottiene la velocità angolare del motore attraverso la velocità orizzontale del drone. Infatti, per velocità abbastanza basse, il contributo del secondo

Tabella 2.7: Quarto caso: relazione tra energia e velocità del drone

Velocità	Volo orizzontale	Volo verticale
1 m/s	100.32 mAh	105.86 mAh
2 m/s	50.18 mAh	61.54 mAh
4 m/s	25.27 mAh	49.80 mAh
8 m/s	14.04 mAh	74.85 mAh

addendo del numeratore è quasi trascurabile rispetto al primo, ovvero quello relativo al peso del drone. Il discorso cambia con velocità maggiori come nell'esempio 8 m/s, le quali rendono quell'addendo più grande e quindi non più trascurabile, aumentando, in proporzione, il consumo di energia.

Analogo è il discorso per il volo verticale. In particolare, si può osservare che il consumo di energia relativo alla velocità di 8 m/s è anche maggiore dei consumi relativi a 2 m/s e 4 m/s. Ciò accade perchè, nella (2.9), il secondo addendo diventa molto più significativo del primo e si inverte la tendenza vista prima.

2.4 FOCUS SULL'HOVERING

Ora si analizzano specificatamente i consumi relativi ai tre tipi diversi di movimento esaminati nel modello empirico, in quanto è quello utilizzato per lo studio del capitolo 4. Non si considera il volo verticale verso il basso posto che, come già si sa, è chiaramente quello più economico in termini di spesa energetica.

Per realizzare il confronto trasformiamo tutti i consumi di energia in consumi di potenza.

Si ottiene che, per quanto riguarda i movimenti orizzontali, il consumo di potenza è costante e pari a 0.31 kW; mentre per quelli verticali verso l'alto il drone consuma dai 0.27 kW ai 0.31 kW di potenza per le distanze considerate nella Tabella 2.4.

Osservando la Tabella 2.6 si può notare quindi, come durante il volo stazionario l'UAV riscontri maggiori consumi rispetto alle altre tipologie di movimento. Considerando anche il fatto che un DBS vola a qualche centinaia di metri di altezza, si può dedurre che la maggiore spesa energetica avvenga quando il drone rimane fermo in hovering. Questo risultato è concorde anche con i vari articoli presenti nella letteratura scientifica. Infatti la spesa energetica dei droni durante il volo stazionario è già nota, ed è per questo che si preferisce tenere il più possibile l'UAV in movimento a velocità moderate seguendo determinate traiettorie ottimizzate, come realizzato per esempio in [16].

3

Droni e sicurezza

3.1 MODELLO DI SISTEMA

Si fa qui riferimento al modello di sistema di [17], in cui si tratta uno scenario di downlink attraverso l'utilizzo di onde millimetriche. L'UAV è impiegato come un DBS, equipaggiato con un array di M antenne che forniscono servizio a N utenti a terra. Per semplicità si assume che le antenne siano disposte in un Uniform Linear Array (ULA) e che lo spazio tra le antenne sia metà della lunghezza d'onda, quindi $d = \lambda/2$. Le altezze del DBS e degli UE sono h_d e h_r , rispettivamente. Gli utenti invece sono modellati come cilindri di altezza media h_b e diametro medio g_b , con $h_r < h_b$. Se il DBS sta comunicando con l'UE n -esimo, tutti gli UE nella zona di copertura di raggio R costituiscono un ostacolo se sono alti abbastanza per bloccare il collegamento LoS tra il DBS e l'UE n -esimo.

Lo schema della rete appena descritta è esposto nella Figura 3.1.

Al contrario di altre bande convenzionali per la comunicazione, nelle onde millimetriche esistono pochi percorsi multipli a causa della loro natura altamente direzionale. Considerando il modello di canale in [17], il vettore di canale dell'array di antenne dal DBS all'UE n -esimo è definito come

$$\mathbf{h}_n = \sqrt{M} \sum_{l=0}^{L-1} \frac{\alpha_{n,l} a(\theta_{n,l})}{\sqrt{PL(\theta_{n,l})}}, \quad (3.1)$$

dove L , $\alpha_{n,l}$, $\theta_{n,l}$ sono rispettivamente il numero di percorsi, guadagno di canale casuale complesso e l'angolo di partenza del percorso l -esimo tra il DBS e l'UE n -esimo. Invece,

3.1. MODELLO DI SISTEMA

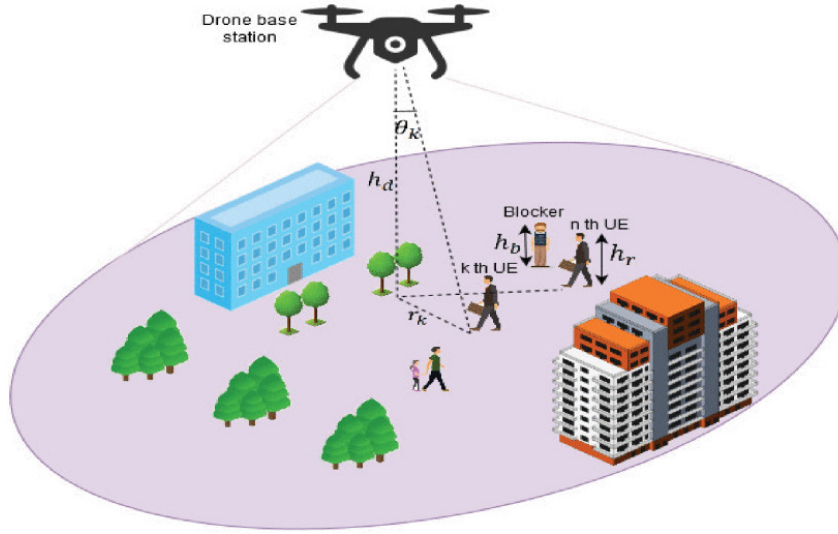


Figura 3.1: Schema della rete [17]

$a(\theta)$ rappresenta lo steering vector dell'ULA, che può essere rappresentato come

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\theta)}, \dots, e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda} (M-1) \sin(\theta)}]. \quad (3.2)$$

$PL(\theta_n, l)$ è il path loss per il percorso l -esimo tra il DBS e l'UE n -esimo. Si considerano due modelli diversi per i collegamenti LoS e i Not-Line of Sight (NLoS):

$$PL(\theta_n) = \begin{cases} \rho_0^L (h_d / \cos \theta_n)^{\eta_L}, \\ \rho_0^N (h_d / \cos \theta_n)^{\eta_N}, \end{cases} \quad (3.3)$$

dove η_L e η_N sono gli esponenti di path loss nei due casi di collegamento. Inoltre ρ_0^L e ρ_0^N sono i path loss a una distanza di riferimento unitaria per i collegamenti LoS e NLoS.

La probabilità che ci sia LoS tra il DBS e l'UE n -esimo è

$$P_{L,n}(r_n, h_d) = \exp\left(-\lambda g_b r_n \frac{h_b - h_r}{h_d - h_r}\right), \quad (3.4)$$

dove $r_n = h_d \tan(\theta_n)$ è la distanza orizzontale tra il DBS e l'UE n -esimo.

Il raggio di copertura R dipende dal QoS minimo registrato dall'utente a terra. Utilizziamo il Signal to Noise Ratio (SNR) come indicatore del QoS per l'UE n -esimo, ovvero

$$SNR_n^{LoS} = \frac{P_t |\alpha_{n,0}|^2}{\rho_0^L N_0 (h_d^2 + r_n^2)^{\frac{\eta_L}{2}}}, \quad (3.5)$$

$$SNR_n^{NLoS} = \frac{P_t \sum_{l=1}^{L-1} |\alpha_{n,l}|^2 |a(\theta_{n,l})^H w(\phi)|^2}{\rho_0^N N_0 (h_d^2 + r_n^2)^{\frac{\eta N}{2}}}, \quad (3.6)$$

dove P_t e N_0 sono rispettivamente la potenza di trasmissione e la potenza del rumore, mentre $(h_d^2 + r_n^2)^{\frac{1}{2}}$ corrisponde alla distanza d tra UAV e UE. Invece, $w(\phi) = a(\phi)$ è il beamforming vector e $|a(\theta_{n,l})^H w(\phi)|^2$ è l'array gain, calcolato così:

$$|a(\theta)^H w(\phi)|^2 = \left| \frac{\sin(\frac{M\pi}{2}(\sin \theta - \sin \phi))}{M \sin(\frac{\pi}{2}(\sin \theta - \sin \phi))} \right|^2. \quad (3.7)$$

Sono stati creati i grafici del SNR in funzione della distanza tra DBS e UE attraverso la scrittura di un codice Python adeguato.

I parametri P_t , N_0 , ρ_0^L e ρ_0^N sono stati modellati in modo tale che

$$\frac{P_t}{\rho_0^L N_0} = d_{max}^{\eta L} \quad (3.8)$$

e

$$\frac{P_t}{\rho_0^N N_0} = d_{max}^{\eta N}, \quad (3.9)$$

con $d_{max} = 200$ m, mentre i restanti parametri utilizzati sono riportati nella Tabella 3.1. Il range della distanza tra utente e DBS è stato fissato arbitrariamente tra 50 e 200 m ed è modellato nella Figura 3.2.

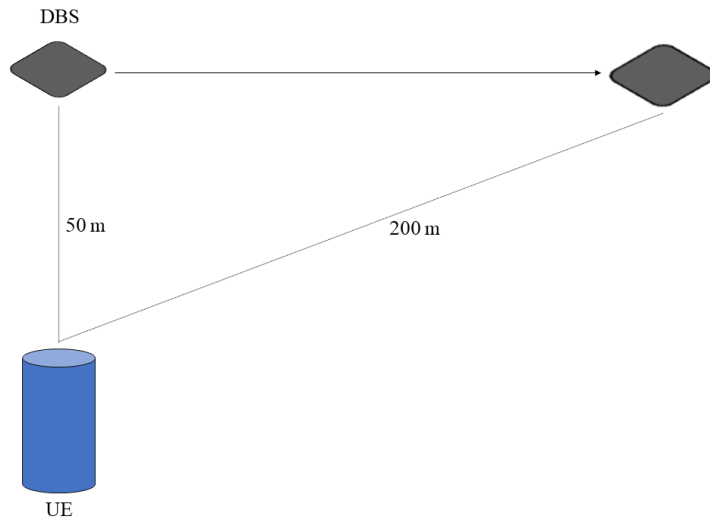


Figura 3.2: Schema della distanza tra UE e DBS

3.1. MODELLO DI SISTEMA

Tabella 3.1: Parametri dei grafici del SNR

Parametro	Valore
d	50 ÷ 200 m
η_L	2.5
η_N	3.5
M	10
L	4
θ	$\mathcal{U}(0, \frac{2\pi}{3})$
ϕ	0 ÷ 2π
α_n	$\mathcal{N}(0, 1)$

I grafici risultanti dalla simulazione sono nelle Figure 3.3 e 3.4.

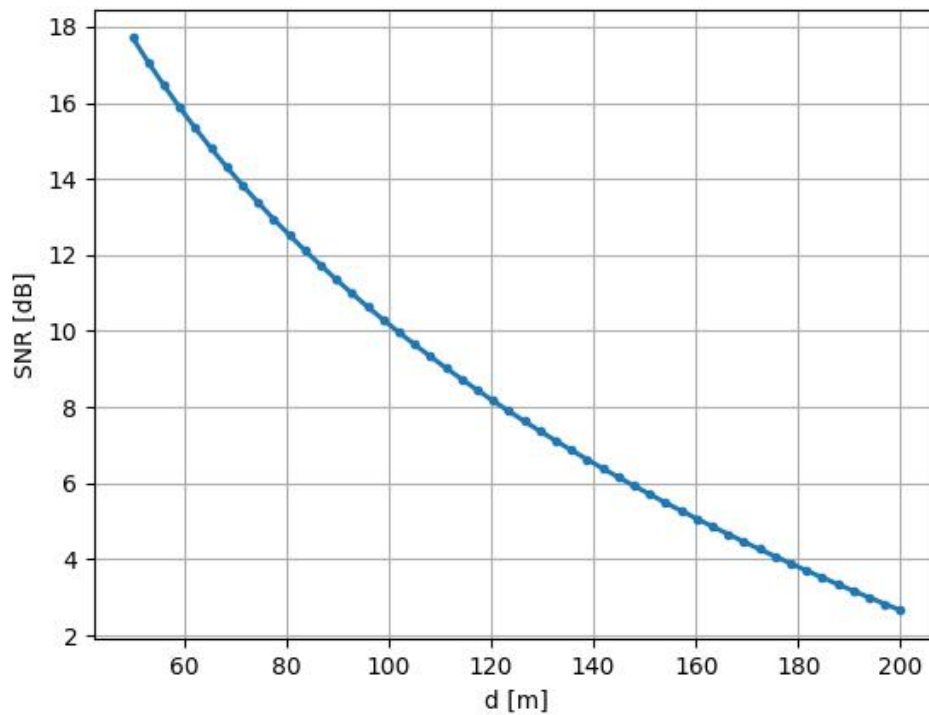


Figura 3.3: Plot del SNR in caso di LoS

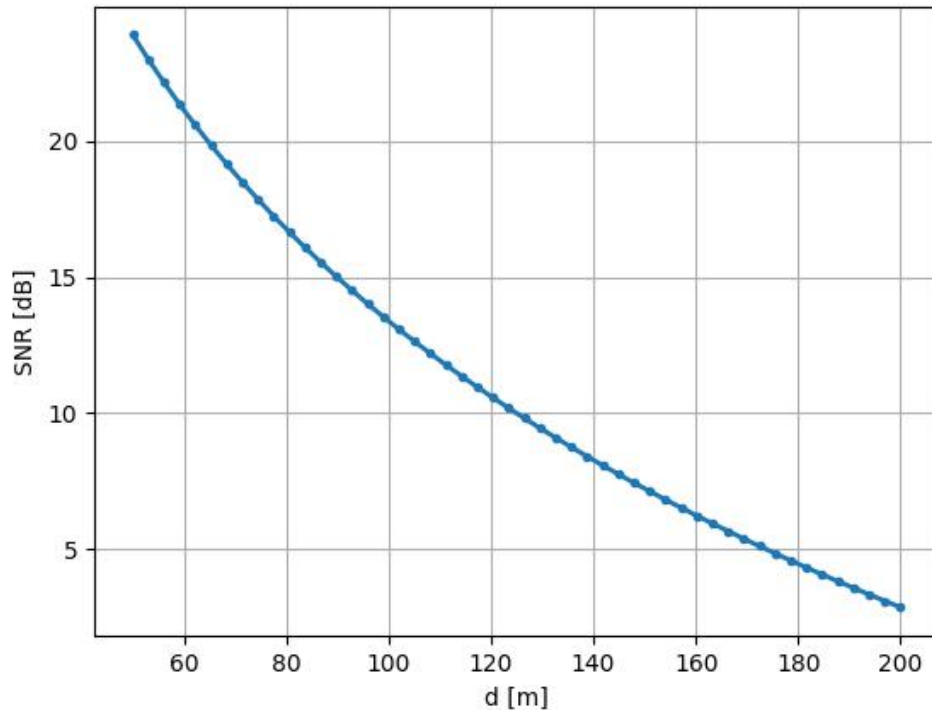


Figura 3.4: Plot del SNR in caso di NLoS

3.2 AUTENTICAZIONE CHALLENGE-RESPONSE

Il paradigma CR è un meccanismo di sicurezza per l'autenticazione attraverso l'uso della crittografia. Un'entità invia una o più domande di cui solo l'altra entità conosce le risposte esatte; l'esempio più semplice è il meccanismo di login con una password, che rappresenta la risposta corretta da dare per autenticarsi.

Nel contesto di questa tesi non si considerano i classici metodi di crittografia, bensì ci si concentra sul Physical-Layer Security (PLS), descritto in [18], ovvero un ramo della sicurezza informatica che sfrutta le proprietà del canale fisico attraverso cui avviene la trasmissione. Il verificatore non invia concretamente una challenge ma cambia le proprietà fisiche dell'ambiente elettromagnetico, e si aspetta di ricevere un segnale in maniera appropriata dal dispositivo che deve autenticarsi.

In particolare si può immaginare uno sciame di droni che coopera con un'entità centrale, per esempio un drone dello stesso gruppo, con il fine di autenticare i messaggi ricevuti. Il canale tra la sorgente e lo sciame può essere parzialmente controllato cambiando la disposizione dei droni. Dato il grande numero di posizioni assumibili dagli UAV si può assicurare un ampio spazio di controllo e dei canali molto variabili.

3.3. PROBABILITÀ DI FALSE ALARM E DI MISS DETECTION

Per semplificare i calcoli, si considera in questo modello un utente a terra e un drone che cambia periodicamente la sua posizione. Si può immaginare che, in maniera continua, il drone rimanga in volo stazionario per un certo tempo T e successivamente si sposti in un'altra posizione dove stazionare nuovamente e così via. Si ipotizza quindi un meccanismo di autenticazione PLS CR in cui la challenge è rappresentata dalla posizione assunta dal drone mentre la risposta è la potenza del segnale ricevuto dal DBS.

Si ipotizza anche la presenza di un attaccante il cui obiettivo è quello di autenticarsi illecitamente. In questo caso il suo tentativo di attacco consiste nel cercare di simulare la potenza del segnale ricevuto dal drone ed ottenere così l'accesso.

3.3 PROBABILITÀ DI FALSE ALARM E DI MISS DETECTION

Dato che l'attaccante cerca di replicare la potenza del segnale ricevuto dal drone, si può dire che vuole avvicinarsi al valore del SNR del canale tra drone e utente. Si prenderà quindi in esame quest'ultimo parametro per i prossimi calcoli.

Si analizza in particolare il valore atteso $E[\text{SNR}]$, che dipende solamente dalla distanza tra utente e drone. Facendo riferimento alla (3.5), si può notare come $E[\text{SNR}]$ corrisponda al SNR originale ma sostituendo a $|\alpha_{n,0}|^2$ la sua media. Quest'ultima è una particolare variabile aleatoria, ovvero la somma di due variabili aleatorie normali standard al quadrato. La sua distribuzione di probabilità è quella della variabile aleatoria chi quadro χ^2 , definita come:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k x_i^2, \quad (3.10)$$

in cui x_i sono le variabili normali $\mathcal{N}(0, 1)$ e k sono i gradi di libertà, ovvero il numero di addendi sommati.

La funzione di densità di probabilità è così caratterizzata:

$$f_k(x) = \frac{1}{2^{k/2}\Gamma(k/2)} x^{k/2-1} e^{-x/2}, \quad (3.11)$$

con $\Gamma(k/2)$ che rappresenta la funzione Gamma, calcolabile in questo modo:

$$\Gamma(k/2) = \sqrt{\pi} \frac{(k-2)!!}{2^{\frac{k-1}{2}}} \quad \text{per } k \text{ dispari} \quad (3.12)$$

$$\Gamma(k/2) = \left(\frac{k}{2} - 1\right)! \quad \text{per } k \text{ pari.} \quad (3.13)$$

Nel caso di $|\alpha_{n,0}|^2$, k è pari a 2 e quindi si ottiene che la sua distribuzione probabilistica è:

$$f(x) = \frac{1}{2}e^{-\frac{x}{2}}, \quad (3.14)$$

che corrisponde alla funzione di densità di una variabile aleatoria esponenziale, calcolata come:

$$f_{\beta}(x) = \beta e^{-\beta x} \quad (3.15)$$

con $\beta = 1/2$.

Perciò la media di $|\alpha_{n,0}|^2$ è pari a $\frac{1}{\beta} = 2$ e si ottiene:

$$E[SNR] = 2 \frac{P_t}{\rho_0^L N_0 d^{\eta_L}}. \quad (3.16)$$

Si può immaginare un intervallo di larghezza L_s , che va dal valore minimo $E[SNR]_{min}$ a quello massimo $E[SNR]_{max}$, all'interno del quale varia l'SNR effettivo a seconda della posizione del drone. Il valore in cui si posiziona l'UAV è dato dal valore di $E[SNR]$ scelto e dalla componente $|\alpha_{n,0}|^2$, che lo sposta leggermente andando a creare un piccolo intervallo di larghezza l_s all'interno del quale si colloca la trasmissione del drone, dato il valore di $E[SNR]$. La dinamica appena spiegata è illustrata nella Figura 3.5.

L'obiettivo è quindi fare in modo che l'attaccante non riesca mai a centrare questo

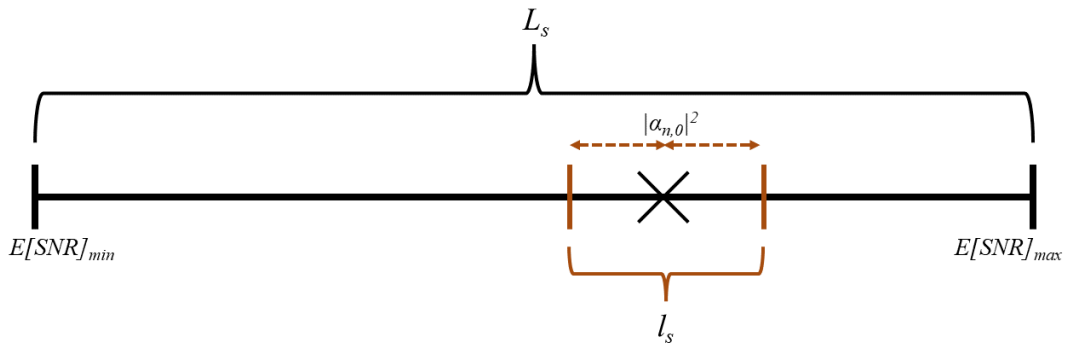


Figura 3.5: Illustrazione di L_s e l_s

intervallo.

Si vuole che $|\alpha_{n,0}|^2$ non porti mai il drone al di fuori dell'intervallo di larghezza l_s altrimenti si verifica un falso allarme, la cui probabilità viene denominata P_{fa} . Perciò:

$$P\left(|\alpha_{n,0}|^2 > \frac{l_s}{2}\right) = P_{fa}. \quad (3.17)$$

3.3. PROBABILITÀ DI FALSE ALARM E DI MISS DETECTION

Pertanto:

$$P\left(\frac{1}{2}e^{-\frac{x}{2}} > \frac{l_s}{2}\right) = P_{fa} \quad (3.18)$$

$$\int_{l_s/2}^{+\infty} \frac{1}{2}e^{-\frac{x}{2}} dx = [-e^{-\frac{x}{2}}]_{l_s/2}^{+\infty} = e^{-\frac{l_s}{4}} = P_{fa}, \quad (3.19)$$

da cui si ricava finalmente che:

$$l_s = -4 \ln(P_{fa}). \quad (3.20)$$

Solamente per i prossimi calcoli si decide di utilizzare i parametri della Tabella 3.1 e della (3.8). Si imposta quindi un range della distanza che va da 50 a 200 m per calcolare L_s :

$$L_s = E[SNR]_{max} - E[SNR]_{min} = 62. \quad (3.21)$$

Utilizzando l_s e L_s si ottiene la probabilità di miss detection P_{md} :

$$P_{md} = \frac{l_s}{L_s} = \frac{-4 \ln(P_{fa})}{L_s}. \quad (3.22)$$

Nella Figura 3.6 è presente il grafico in scala logaritmica che lega la probabilità di un falso allarme a quella di miss detection.

Si decide arbitrariamente di scegliere $P_{fa} = 5\%$ da cui si ottiene $l_s = 12$.

Per comodità si denomina $\gamma = E[SNR]$ e si definisce:

$$A = \frac{P_t}{\rho_0^L N_0} = d_{max}^{\eta_L}, \quad (3.23)$$

perciò si ha:

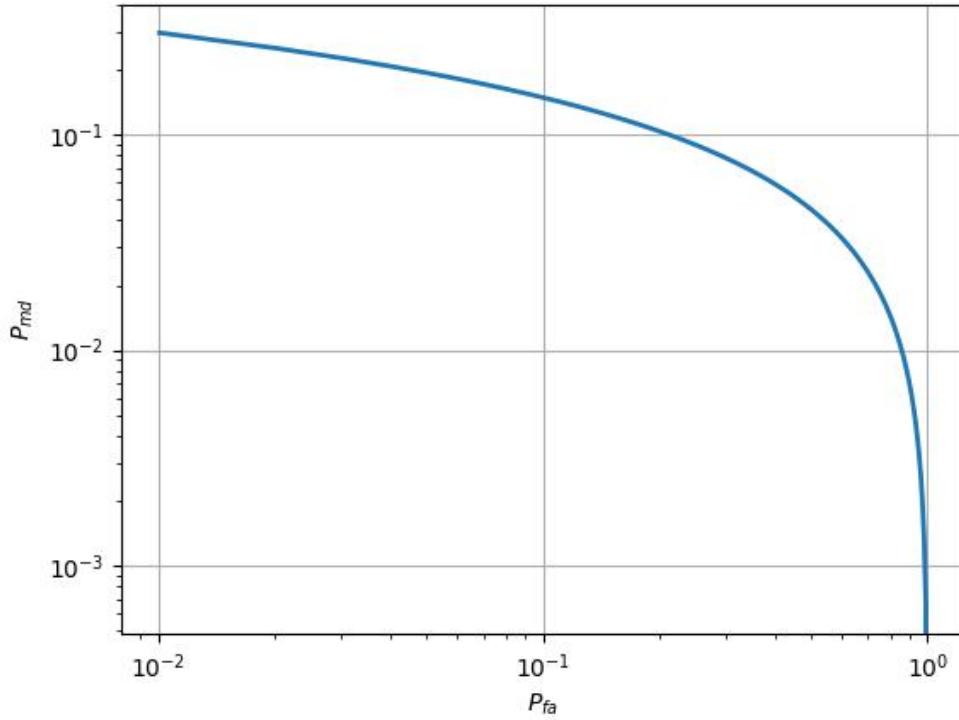
$$\gamma = 2 \frac{A}{d^{\eta_L}} = 2 \left(\frac{d_{max}}{d} \right)^{\eta_L}. \quad (3.24)$$

Si desidera osservare come si deve distribuire la variabile d in modo che $E[SNR]$ sia una variabile uniforme all'interno del suo intervallo, ossia:

$$1 - \frac{x - \gamma_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} = P(\gamma > x) = P\left(2 \left(\frac{d_{max}}{d}\right)^{\eta_L} > x\right) = P\left(d < \frac{d_{max}}{\left(\frac{x}{2}\right)^{1/\eta_L}}\right). \quad (3.25)$$

Si ottiene la distribuzione di probabilità di d così:

$$F_d\left(\frac{d_{max}}{\left(\frac{x}{2}\right)^{1/\eta_L}}\right) = 1 - \frac{x - \gamma_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}}, \quad (3.26)$$


 Figura 3.6: Plot di P_{md} in funzione di P_{ma}

dove $x \in [\gamma_{min}, \gamma_{max}]$.

Si esegue il cambio di variabile $y = \frac{d_{max}}{(x/2)^{1/\eta_L}}$ e si ottiene:

$$F_d(y) = 1 - \frac{2\left(\frac{d_{max}}{y}\right)^{\eta_L} - \gamma_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}}. \quad (3.27)$$

Data una qualsiasi variabile aleatoria v si ha che $F_v(a) = P(v \leq a)$, quindi si deve ottenere $F_d(y) = 0$ per $y < \bar{y}_1$ e $F_d(y) = 1$ per $y < \bar{y}_2$. Perciò si ha $y \in [\bar{y}_1, \bar{y}_2] = \left[\frac{d_{max}}{(\frac{\gamma_{max}}{2})^{1/\eta_L}}, \frac{d_{max}}{(\frac{\gamma_{min}}{2})^{1/\eta_L}} \right] = [d_{min}, d_{max}]$.

Si calcola la funzione di densità derivando $F_d(y)$, ovvero:

$$f_d(y) = \frac{dF_d(y)}{dy} = \frac{2\eta_L \left(\frac{d_{max}}{y}\right)^{\eta_L}}{y(\gamma_{max} - \gamma_{min})}. \quad (3.28)$$

3.3. PROBABILITÀ DI FALSE ALARM E DI MISS DETECTION

Si può controllare la correttezza dei calcoli verificando che l'integrale di $f_d(y)$ tra \bar{y}_1 e \bar{y}_2 sia pari a 1, cioè:

$$\int_{\bar{y}_1}^{\bar{y}_2} f_d(y) = \left[\frac{2 \left(\frac{d_{max}}{y} \right)^{\eta_L}}{\gamma_{min} - \gamma_{max}} \right]_{d_{min}}^{d_{max}} = \frac{\gamma_{min} - \gamma_{max}}{\gamma_{min} - \gamma_{max}} = 1. \quad (3.29)$$

Il grafico della funzione di densità di probabilità della distanza è illustrato nella Figura 3.7.

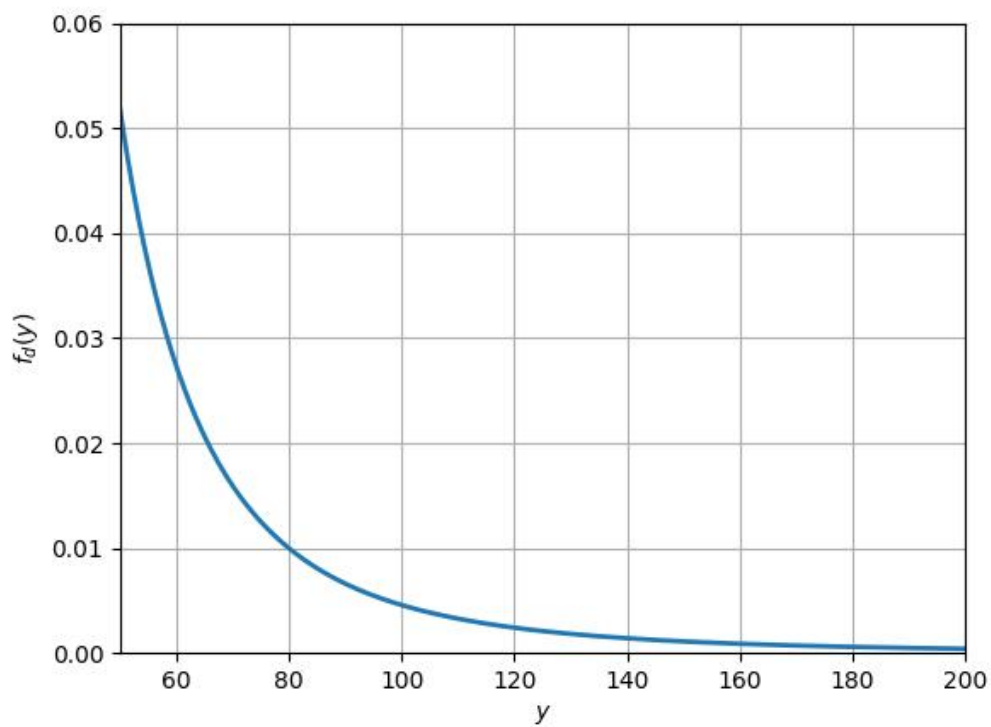


Figura 3.7: Plot di $f_d(y)$

4

Consumi energetici e sicurezza

Si tenta ora di trovare il legame tra i consumi energetici del drone e il suo livello di sicurezza.

La traiettoria del drone è modellata in modo tale che ci sia un utente a terra UE e che l'UAV, in maniera continua, rimanga in volo stazionario per un certo tempo T , e successivamente si sposti in un'altra posizione dove stazionare nuovamente e così via. Negli studi che verranno eseguiti in questo capitolo si terrà in considerazione solo l'energia consumata per i movimenti e non quella spesa anche per l'hovering.

Grazie ai calcoli svolti nel capitolo 3, si possono campionare delle variabili aleatorie uniformi all'interno dell'intervallo di $E[\text{SNR}]$, da cui ricavarsi le distanze percorse dal drone e infine l'energia consumata attraverso il modello empirico del capitolo 2.

4.1 ANALISI BIDIMENSIONALE

Si realizza intanto un'analisi bidimensionale in cui il drone compie soltanto movimenti orizzontali, posto a un'altezza fissa (e quindi a una distanza minima dall'utente) di 20 m. Quest'ultima è minore delle altezze di volo reali, ossia qualche centinaia di metri come già detto nel capitolo 1, in modo da poter considerare un range di distanze più ampio e poter osservare meglio come variano la probabilità di miss detection e l'energia media consumata dall'UAV. La distanza massima tra il DBS e l'utente è variabile ed è ciò che permetterà di mettere in relazione la P_{md} e l'energia consumata. Infatti, se il drone non può allontanarsi molto dall'UE dovrà percorrere distanze brevi e si otterranno quindi bassi consumi. D'altro canto L_s sarà minore e P_{md} maggiore. Campionando due distanze tra UE e UAV, lo spazio percorso dal drone non è semplicemente la differenza tra esse. Se per esempio il range di distanza dall'utente va da 20

4.1. ANALISI BIDIMENSIONALE

m a 100 m, il raggio di azione orizzontale R dell'UAV si calcola attraverso il teorema di Pitagora:

$$R = \sqrt{100^2 - 20^2} = 97.98 \text{ m.} \quad (4.1)$$

Di conseguenza, ad ogni distanza che viene campionata si può associare una circonferenza di raggio minore di R attraverso il teorema di Pitagora. Tra gli infiniti punti nella circonferenza trovata si sceglie sempre quello più vicino alla posizione attuale del drone che quindi si muoverà lungo una linea retta all'interno della circonferenza di raggio R . Ciò è illustrato nella Figura 4.1.

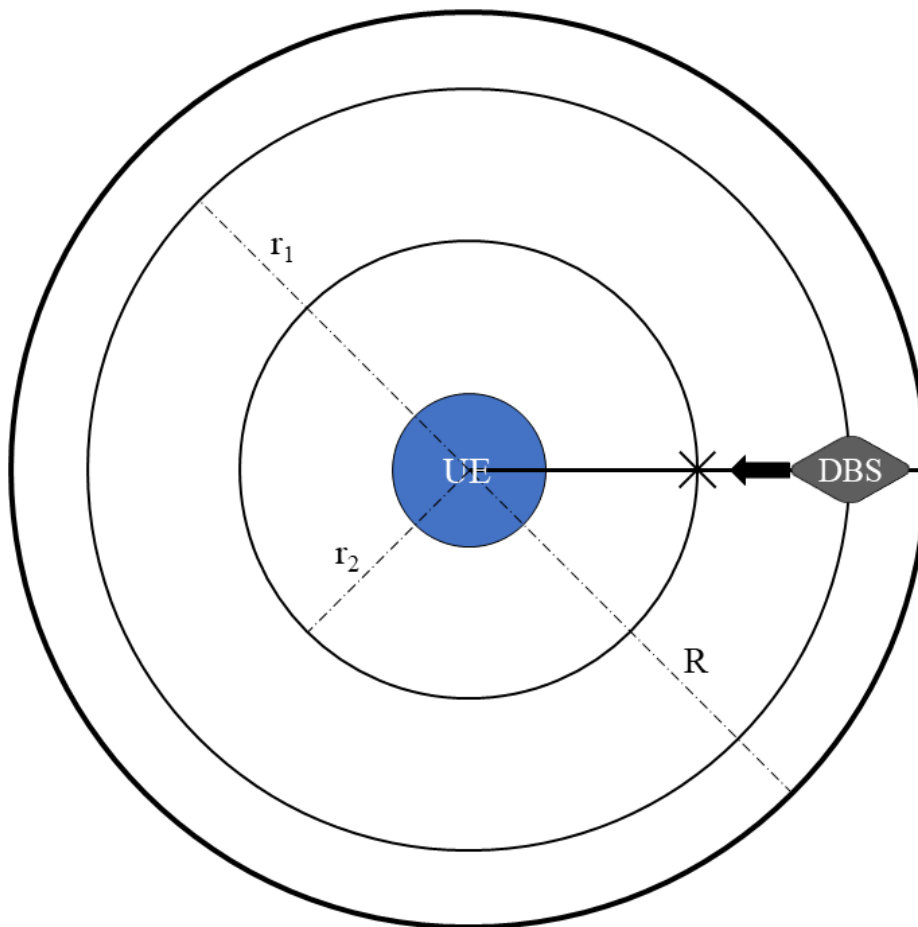


Figura 4.1: Illustrazione dell'analisi bidimensionale dall'alto

L'analisi della relazione tra energia consumata dal drone e probabilità di miss detection avviene aumentando man mano la distanza massima tra utente e UAV. In particolare, assume i seguenti valori: 50 m, 60 m, 70 m, 80 m, 100 m, 125 m, 150 m, 175 m, 200 m, 250 m, 300m.

Per ognuno di questi range di distanze varia l'intervallo di $E[\text{SNR}]$ di larghezza L_s e quindi anche P_{md} viene modificata. Il drone compie un totale di 100000 movimenti

casuali all'interno di ogni raggio di azione e viene calcolata l'energia spesa mediamente E_m .

Il risultato ottenuto è esposto nella Tabella 4.1 e nel grafico in Figura 4.2. La Tabella presenta i parametri di distanza utilizzati e i vari risultati ottenuti, mentre il grafico illustra l'andamento della probabilità di miss detection al variare dell'energia media consumata.

Tabella 4.1: Risultati dell'analisi bidimensionale

Range distanza	L_s	P_{md}	E_m
20 ÷ 50 m	17.76	67.55%	67 mAh
20 ÷ 60 m	29.18	41.13%	77 mAh
20 ÷ 70 m	43.84	27.38%	84 mAh
20 ÷ 80 m	62.00	19.35%	89 mAh
20 ÷ 100 m	109.80	10.93%	97 mAh
20 ÷ 125 m	193.31	6.21%	104 mAh
20 ÷ 150 m	306.09	3.92%	108 mAh
20 ÷ 175 m	450.95	2.66%	110 mAh
20 ÷ 200 m	630.46	1.90%	113 mAh
20 ÷ 250 m	1102.85	1.09%	116 mAh
20 ÷ 300 m	1740.84	0.69%	117 mAh

Dai valori e dal grafico ottenuti è ben chiaro che tra la probabilità di miss detection e l'energia spesa dal drone è presente una forte correlazione. Infatti più è largo il raggio di azione del drone, più distanza percorre, più aumenta il consumo di energia. Allo stesso tempo, maggiore è lo spazio in cui può muoversi il DBS, maggiore è L_s e minore è P_{md} . Difatti si può notare, sia nella Tabella 4.1 che nel grafico 4.2, come E_m aumenti al crescere del range della distanza tra utente e UAV e come, invece, P_{md} diminuisca.

In questo caso il livello di sicurezza dipenderebbe dalla massima distanza possibile tra il drone e l'UE. Se quest'ultima fosse pari a 100 m e se si mantenesse l'altezza fissata a 20 m, si avrebbe una probabilità di miss detection del 10.93%. Quest'ultimo non è un valore ottimale ma bisogna ricordare che per semplicità si sta considerando la presenza di un solo drone. Se, come già detto nel capitolo 3, si considerasse uno sciame di UAV il numero di posizioni assumibili da essi sarebbe grande, assicurando un ampio spazio di controllo e dei canali molto variabili. Ciò comporterebbe che l'attaccante dovrebbe simulare tutti i valori di $E[\text{SNR}]$ tra l'UE e i droni, diminuendo significativamente la probabilità di miss detection.

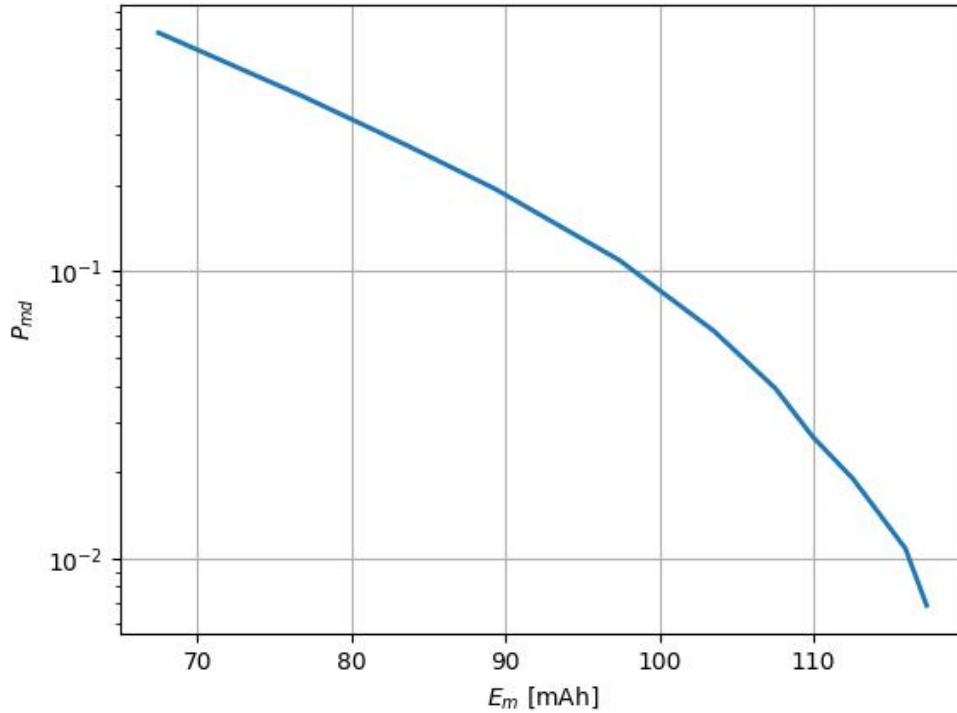


Figura 4.2: Plot di P_{md} in funzione di E_m nell'analisi bidimensionale

4.2 ANALISI TRIDIMENSIONALE

Si procede ora a realizzare un'analisi tridimensionale in cui il drone può muoversi sia orizzontalmente che verticalmente. Contrariamente all'analisi bidimensionale, il DBS non vola ad un'altezza fissa ma bisogna comunque imporre un limite inferiore h_{min} oltre cui il drone non può spingersi perchè potrebbe incontrare vari ostacoli nel suo tragitto. Si pone arbitrariamente questa altezza minima pari a 10 m. Così come per l'analisi bidimensionale, la h_{min} scelta è minore delle altezze di volo reali in modo da poter analizzare un intervallo di distanze più ampio e osservare meglio come variano P_{md} e l'energia media consumata dall'UAV.

In questo caso, la posizione del drone è caratterizzata da 3 coordinate (x, y, z) . Le prime due riguardano il piano orizzontale mentre la terza regola l'altezza di volo. Si procede sempre campionando distanze tra l'UE e l'UAV ma, rispetto a prima, è più complicato ricavare il tragitto che deve compiere il drone per raggiungere quella data distanza. Immaginandosi il drone in una certa posizione (x_1, y_1, z_1) , si campiona una certa distanza d_1 dall'utente che il DBS deve raggiungere. Ciò crea una sfera che ha come centro l'UE e come raggio $r = d_1$, che rappresenta tutti i punti raggiungibili dal drone per porsi a quella distanza dall'utente. L'UAV dovrà scegliere uno di questi

punti, ovvero (x_2, y_2, z_2) , in modo tale che:

$$x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 = r^2. \quad (4.2)$$

Il drone può arrivare in quel punto in infiniti modi. Si sceglie, per questo caso di studio, il percorso a minima distanza tra la posizione attuale dell'UAV e la sfera. Non è detto che questa sia la soluzione più efficace dal punto di vista dei consumi, dato che ci sono dei movimenti preferibili rispetto ad altri in questo senso, ma è quella più immediata. Tutta la situazione appena descritta è illustrata nella Figura 4.3.

Può però capitare che, scegliendo il percorso a minima distanza, il drone capiti al di sotto dell'altezza minima h_{min} . In questo caso si prende la distanza tra il DBS e il punto della sfera più vicino avente la coordinata $z = h_{min}$.

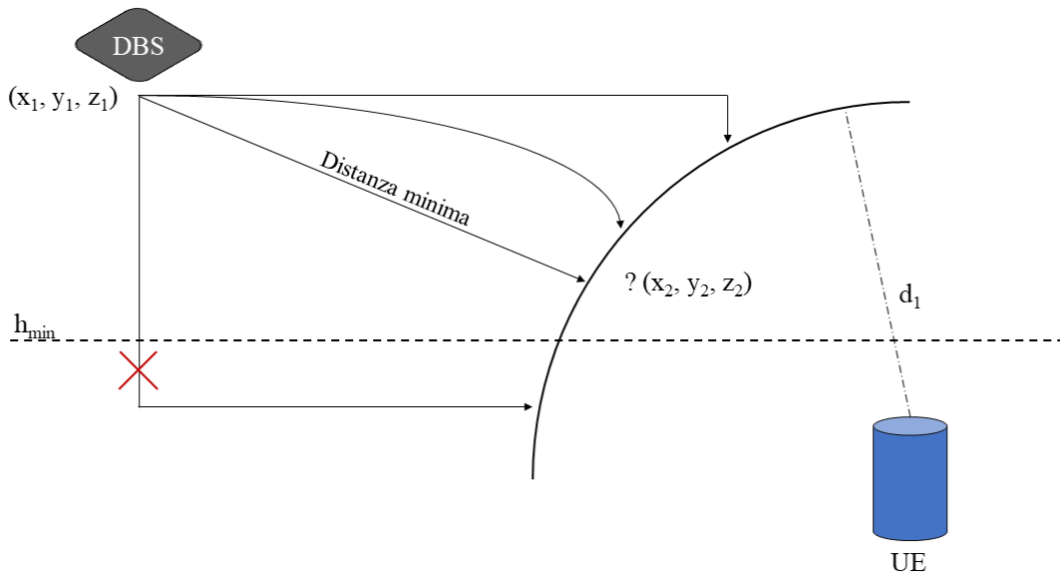


Figura 4.3: Illustrazione dell'analisi tridimensionale

Per cercare di estrarre il consumo energetico del drone dai movimenti campionati, si prendono due casi in considerazione. Nel primo si divide il percorso del drone (generalmente obliquo) in un movimento orizzontale e uno verticale che diventano i cateti di un triangolo rettangolo, come mostrato in Figura 4.4.

Attraverso queste due distanze, che sono:

$$d_h = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|, \quad (4.3)$$

$$d_v = |z_1 - z_2|, \quad (4.4)$$

4.2. ANALISI TRIDIMENSIONALE

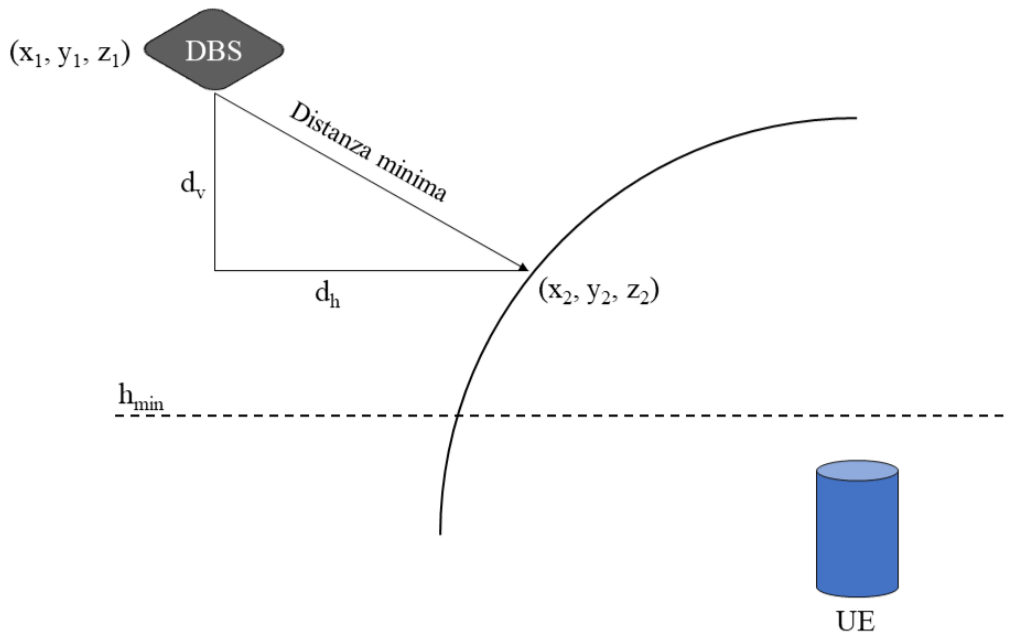


Figura 4.4: Prima soluzione per il calcolo dei consumi nell'analisi tridimensionale

si può calcolare l'energia spesa attraverso il modello empirico del capitolo 2, in particolare le (2.13), (2.14) e (2.15).

Nel secondo caso invece si fa riferimento ai risultati degli esperimenti realizzati in [19], che mostrano come il consumo energetico realizzato per volare in obliquo sia praticamente pari a quello per volare verticalmente, sia verso l'alto che verso il basso.

In entrambi i casi, così come nell'analisi bidimensionale, si aumenta gradualmente la distanza massima tra utente e UAV per mettere in relazione l'energia consumata e la probabilità di miss detection. In particolare, d_{max} assume i seguenti valori: 50 m, 60 m, 70 m, 80 m, 90 m, 100 m, 120 m, 140 m, 160 m, 180 m. Il drone compie un totale di 250000 movimenti casuali all'interno di ogni range di distanza e viene calcolata l'energia spesa mediamente, chiamata E_{m1} per il primo caso ed E_{m2} per il secondo.

I risultati ottenuti sono esposti nella Tabella 4.2 e nei grafici nelle Figure 4.5 e 4.6.

Si può notare come l'andamento dei grafici dell'analisi tridimensionale e quello dell'analisi bidimensionale sia praticamente identico. Infatti, anche nella Tabella 4.2, E_{m1} e E_{m2} aumentano al crescere del range della distanza tra utente e drone, mentre P_{md} diminuisce.

La grande differenza sta nei valori di energia media consumata. Quelli dell'analisi tridimensionale (praticamente uguali nei due casi) sono circa 1/3 rispetto a quelli dell'analisi bidimensionale. Ciò si spiega attraverso la presenza dei movimenti verticali e attraverso le (2.13), (2.14) e (2.15). Volare verticalmente verso il basso è ovviamente

Tabella 4.2: Risultati dell'analisi tridimensionale

Range distanza	L_s	P_{md}	E_{m1}	E_{m2}
10 ÷ 50 m	109.80	10.93%	19.7 mAh	19.5 mAh
10 ÷ 60 m	174.36	6.88%	21.3 mAh	21.1 mAh
10 ÷ 70 m	257.28	4.66%	22.5 mAh	22.3 mAh
10 ÷ 80 m	360.04	3.33%	23.2 mAh	23 mAh
10 ÷ 90 m	484.00	2.48%	23.7 mAh	23.6 mAh
10 ÷ 100 m	630.46	1.90%	24.4 mAh	24.2 mAh
10 ÷ 120 m	995.66	1.20%	25 mAh	24.8 mAh
10 ÷ 140 m	1464.73	0.82%	25.5 mAh	25.4 mAh
10 ÷ 160 m	2046.00	0.59%	25.9 mAh	25.7 mAh
10 ÷ 180 m	2747.23	0.44%	26.2 mAh	26 mAh

il movimento più economico in termini di consumi a causa dell'azione della forza di gravità. Tuttavia, per distanze brevi, anche volare verticalmente verso l'alto è più economico rispetto a volare orizzontalmente. D'altra parte, aumentando la distanza non si può più dire lo stesso, a causa del fattore moltiplicativo maggiore nella (2.14).

4.2. ANALISI TRIDIMENSIONALE

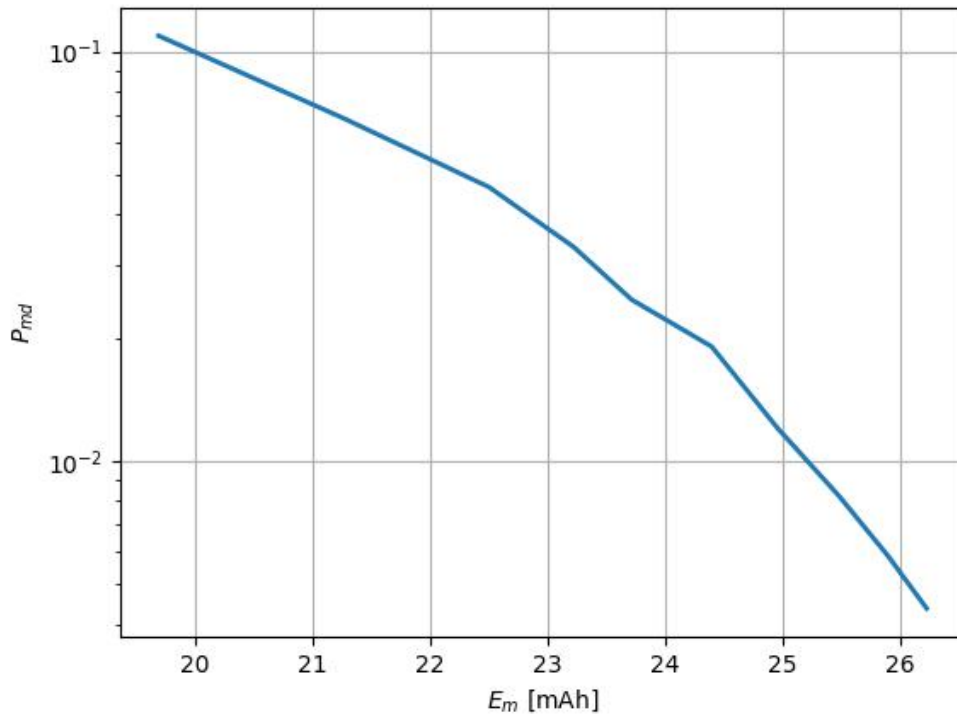


Figura 4.5: Plot del primo caso dell'analisi tridimensionale

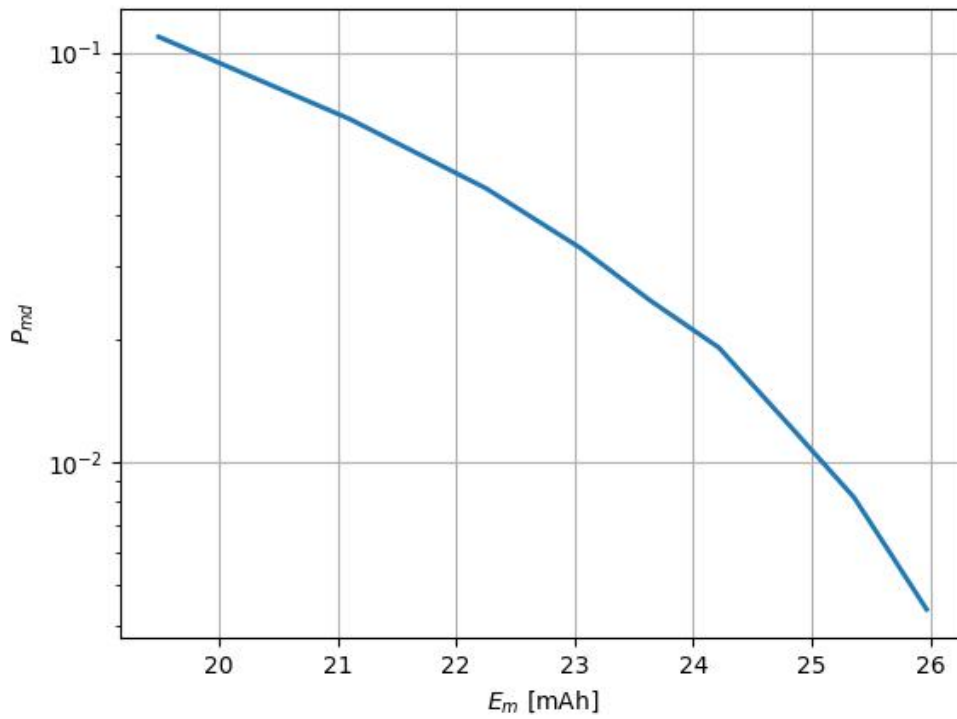


Figura 4.6: Plot del secondo caso dell'analisi tridimensionale



Conclusioni

I droni rappresentano sicuramente un pezzo di futuro nelle prossime generazioni di rete. Sono strumenti con innumerevoli vantaggi ma anche con certi aspetti a cui prestare attenzione o da migliorare.

Per quanto riguarda l'efficienza energetica, in questa tesi è stato dimostrato che l'hovering è la dinamica meno vantaggiosa per i droni in termini di consumi. Per questo motivo la ricerca sta già analizzando e sperimentando traiettorie ottimizzate per sciami di droni. Essendo veicoli molto leggeri e manovrabili, è necessario perfezionare ogni loro movimento regolandone la velocità, l'altezza di volo e la distanza percorsa, in modo da trarne il maggiore vantaggio possibile.

La sicurezza è un altro tema a cui prestare attenzione. Dall'analisi eseguita in questo lavoro, si evince che non rappresenta un grosso problema, a condizione che si utilizzino sistemi multi-UAV con un ampio spazio di controllo. In questo caso, utilizzando l'autenticazione PLS CR, le posizioni assumibili dai droni sono tante e di conseguenza i canali sono molto variabili. Ciò complica molto l'accesso a un eventuale attaccante, rendendo sicura la comunicazione.

Bibliografia

- [1] Faisal Tariq et al. «A Speculative Study on 6G». In: *CoRR* abs/1902.06700 (2019). arXiv: 1902.06700. URL: <http://arxiv.org/abs/1902.06700>.
- [2] Khaled B. Letaief et al. «Edge Artificial Intelligence for 6G: Vision, Enabling Technologies, and Applications». In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 40.1 (2022), pp. 5–36. DOI: 10.1109/JSAC.2021.3126076.
- [3] Elias Yaacoub e Mohamed-Slim Alouini. «A Key 6G Challenge and Opportunity Connecting the Base of the Pyramid: A Survey on Rural Connectivity». In: *Proceedings of the IEEE* 108.4 (2020), pp. 533–582. DOI: 10.1109/JPROC.2020.2976703.
- [4] Marco Giordani e Michele Zorzi. «Non-Terrestrial Networks in the 6G Era: Challenges and Opportunities». In: *IEEE Network* 35.2 (mar. 2021), pp. 244–251. DOI: 10.1109/mnet.011.2000493.
- [5] Marco Giordani e Michele Zorzi. «Satellite Communication at Millimeter Waves: a Key Enabler of the 6G Era». In: *2020 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. 2020, pp. 383–388. DOI: 10.1109/ICNC47757.2020.9049651.
- [6] Denise Birabwa, Daniel Ramotsoela e Neco Ventura. «Service-Aware User Association and Resource Allocation in Integrated Terrestrial and Non-Terrestrial Networks: A Genetic Algorithm Approach». In: *IEEE Access* 10 (set. 2022), pp. 104337–104357. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3210327.
- [7] Shuhang Zhang, Hongliang Zhang e Lingyang Song. «Beyond D2D: Full Dimension UAV-to-Everything Communications in 6G». In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 69.6 (2020), pp. 6592–6602. DOI: 10.1109/TVT.2020.2984624.
- [8] Mahyar Nemati et al. «Non-Terrestrial Networks with UAVs: A Projection on Flying Ad-Hoc Networks». In: *Drones* 6.11 (2022). ISSN: 2504-446X. DOI: 10.3390/drones6110334. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/6/11/334>.

BIBLIOGRAFIA

- [9] Iman Valiulahi e Christos Masouros. «Multi-UAV Deployment for Throughput Maximization in the Presence of Co-Channel Interference». In: *IEEE Internet of Things Journal* 8.5 (2021), pp. 3605–3618. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3023010.
- [10] Yukai Chen et al. «A Case for a Battery-Aware Model of Drone Energy Consumption». In: *2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. 2018, pp. 1–8. DOI: 10.1109/INTLEC.2018.8612333.
- [11] NLM Jeurgens. «Implementing a Simulink controller in an AR. Drone 2.0». In: *Journal of the Franklin Institute* 2016 (2016).
- [12] Liborio Fedele. *Recensione Parrot AR.Drone 2.0: elicottero iPhone-controllato con fotocamera a 720p - Nerdvana - Nerd Magazine — nerdvana.it*. <https://www.nerdvana.it/2013/03/18/recensione-parrot-ar-drone-2-0-elicottero-iphone-controllato-con-fotocamera-720p/>.
- [13] Hasini Viranga Abeywickrama et al. «Comprehensive Energy Consumption Model for Unmanned Aerial Vehicles, Based on Empirical Studies of Battery Performance». In: *IEEE Access* 6 (2018), pp. 58383–58394. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2875040.
- [14] Intel; Aero Ready to Fly Drone; PX4 v1.9.0 User Guide — [docs.px4.io](https://docs.px4.io/v1.9.0/en/complete_vehicles/intel_aero.html). https://docs.px4.io/v1.9.0/en/complete_vehicles/intel_aero.html.
- [15] S. Newman. *The Foundations of Helicopter Flight*. Wiley, 1994. ISBN: 9780470233948. URL: <https://books.google.it/books?id=3LhTAAAMAAJ>.
- [16] Qingqing Wu, Yong Zeng e Rui Zhang. «Joint Trajectory and Communication Design for Multi-UAV Enabled Wireless Networks». In: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 17.3 (2018), pp. 2109–2121. DOI: 10.1109/TWC.2017.2789293.
- [17] Hossein Vaezy et al. «Beamforming for Maximal Coverage in mmWave Drones: A Reinforcement Learning Approach». In: *IEEE Communications Letters* 24.5 (2020), pp. 1033–1037. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.2974958.
- [18] Stefano Tomasin et al. «Challenge-Response Physical Layer Authentication over Partially Controllable Channels». In: *IEEE Communications Magazine* 60.12 (2022), pp. 138–144. DOI: 10.1109/MCOM.001.2200339.
- [19] Yanxiang Yang et al. «Global Energy Consumption Optimization for UAV Swarm Topology Shaping». In: *Energies* 15.7 (2022). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en15072416. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/7/2416>.

Ringraziamenti

Voglio ringraziare l'Università degli Studi di Padova e il mio relatore Stefano Tomasin per avermi dato l'opportunità di conseguire questo obiettivo. Ringrazio particolarmente la mia famiglia per non avermi mai fatto mancare niente e i miei amici Davide, Lorenzo e Gianmarco per aver alleggerito questo percorso. Infine un ringraziamento speciale va a Beatrice, la persona che mi ha sempre sostenuto e da cui ho imparato tanto, incoraggiandomi in tutto continuamente.