



Politecnico di Torino

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

**Analisi di un sistema propulsivo elettrico
per mini piattaforme stratosferiche**

Realizzazione di un simulatore aerodinamico e relativo power budget

Candidato:

Lorenzo Strocchi

Relatore:

Prof. Paolo Guglielmi

Correlatore:

**Ing. Victor Miherea
Dott. Gabriele Sartor**

Ringraziamenti

Prima di procedere con la trattazione, vorrei dedicare qualche riga a tutti coloro che mi sono stati vicini in questo percorso di crescita personale e professionale.

Penso sia doveroso ringraziare, prima di tutto, coloro che hanno contribuito direttamente al completamento di questa Tesi e, quindi, il Professor Paolo Guglielmi, per aver dimostrato sempre un'attenzione ed una disponibilità particolari a risolvere i miei dubbi durante la stesura di questo elaborato e i miei Tutor, Victor Miherea e Gabriele Sartor, che, oltre ad essere sempre stati disposti a fornirmi consigli tecnici e non (sia sul miglior metodo per condurre le ricerche necessarie al mio studio sia sul miglior paninaro da cui andare a mangiare in pausa pranzo), mi hanno dimostrato che anche in un lavoro come quello dell'Ingegnere, dove la meticolosità ed il calcolo regnano indiscussi, c'è sempre spazio per l'ironia, il buon umore e la passione per quello che facciamo.

Non posso non menzionare le tre uniche Persone che mi hanno sempre, ostinatamente, dato tutto senza mai chiedere niente per sé. Anche se rappresentano la mia famiglia, non è un qualcosa che va dato per scontato, non finirò mai di ringraziarvi per avermi permesso di arrivare fin qui.

Penso che adesso sia il momento di ringraziare tutti quelli che non hanno contribuito al completamento di questo percorso di studi ma, al contrario, hanno fatto di tutto per farmi perdere tempo nei modi più strani, riuscendo, però, a rendere questi anni indimenticabili.

Partirò dal gruppo più recente e inaspettato di amici e amiche di cui mi sono circondato, grazie ai quali ho conosciuto persone da ogni parte del mondo, ho intrapreso una surreale carriera da insegnante improvvisato e ho rischiato di farmi ammazzare da uno sciame infuriato di api e fuchi.

Un grazie di cuore va anche ai miei colleghi di corso, con cui ho condiviso l'intero percorso universitario. È grazie a voi che ho superato i momenti più difficili, progettato l'innovativo PK-223 e mangiato i kebab più disperati.

Proseguo nel ringraziare un gruppo più storico di amici, denominato il “Dream Team”, di cui purtroppo per un soffio non ho fatto parte, ma del quale mi ritengo comunque un membro onorario. Con voi ho passato le serate più insolite e pittoresche, di cui conservo storie, ricordi e meme di ogni tipo.

Finalmente, con grande letizia d’animo, menziono “Quelli di Arma City”, un gruppo di vecchi amici e, forse, anche qualcosa di più che mi sono stati al fianco sempre, assecondando ogni mio capriccio, iniziativa o trovata stravagante (dai tornei improvvisati con tanto di premi alle cene organizzate con tanto di risate e bei momenti). Voi ci sarete sempre e so che per questo non c’è bisogno di aggiungere altro.

Non mi resta che ringraziare coloro che non si sono sentiti ancora coinvolti, ma che hanno contribuito anche in piccolissima parte a realizzare il mio sogno fin da quando ero bambino, grazie a tutti coloro che hanno reso questo sogno un po’ più bello ed unico.

Ringrazio la mia fidanzata Jenna per avermi trasmesso la sua immensa forza e il suo instancabile spirito. Grazie per essere stata così speciale nei miei confronti e avermi guidato in questi ultimi anni, con parole d’affetto e minacce. Ti ho ringraziata per ultima...ma, in ogni caso, sei sempre prima nei miei pensieri.

Infine, dedico questa Tesi a me stesso, ai miei sacrifici e alla mia tenacia che mi hanno permesso di raggiungere l’ambito obiettivo. Ebbene sì, nonostante tutto, sono riuscito a diventare Dottore!

Non considero questo un traguardo, ma un nuovo punto di partenza, io continuerò ad avanzare, voi continuate a guardare in alto...

Indice

Elenco delle figure	5
Elenco delle tabelle	8
1 Introduzione	10
1.1 L'ambiente in cui operano	11
1.2 Perché vengono definite High Altitude Pseudo-Satellite (HAPS)	12
1.3 Le soluzioni già esistenti	13
2 Una nuova configurazione	26
2.1 Trattazione Fisico - Matematica	31
2.2 Studio della direzione dei venti	38
2.3 Calcolo della potenza meccanica	45
3 Presentazione dei risultati	51
3.1 Grafici riassuntivi	53
3.2 Alcune osservazioni interessanti	59
3.3 Tabelle conclusive e confronti	63
3.4 Analisi di alcuni casi particolari	68
4 Power budget	72
4.1 Strumentazione di bordo	73
4.2 Variazione dell'irraggiamento solare	78
4.3 Pannelli Fotovoltaici	89
4.4 Trasmissione di potenza wireless	96
4.5 Future soluzioni per l'accumulo di energia	100
5 Conclusioni e sviluppi futuri	104
Bibliografia	106
Sitografia	111

Elenco delle figure

1.1	<i>Venti medi per Cape Kennedy, FL, durante tutto l'anno</i>	11
1.2	<i>Airbus Zephyr 8</i>	13
1.3	<i>Boeing Phantom Works - Solar Eagle</i>	15
1.4	<i>Google - Titan Aerospace - Solara 50</i>	16
1.5	<i>Facebook - connectivity lab - drone a energia solare</i>	17
1.6	<i>Aerovironment - Pathfinder</i>	18
1.7	<i>NASA / AeroVironment - Helios</i>	19
1.8	<i>Silent Falcon - UAV</i>	20
1.9	<i>Atlantik Solar - UAV</i>	21
1.10	<i>Lockheed Martin - HALE-D</i>	22
1.11	<i>Thales Group - Stratobus)</i>	24
1.12	<i>The Loon Balloon flight system</i>	25
2.1	<i>Suddivisione tra light, medium e heavy balloons</i>	27
2.2	<i>Schema di riferimento</i>	28
2.3	<i>Schema di riferimento con relative forze in gioco</i>	31
2.4	<i>Forze agenti sulla corda</i>	32
2.5	<i>Relazione tra coefficienti aerodinamici ed inclinazione del pallone.</i>	36
2.6	<i>Mappa iterativa</i>	37
2.7	<i>Schema dei venti con visuale dall'alto</i>	38
2.8	<i>Caso di differenza delle direzioni dei venti minore di 90°</i>	40
2.9	<i>Caso di differenza delle direzioni dei venti tra i 90° e i 180°</i>	41
2.10	<i>Caso di differenza delle direzioni dei venti tra i 180° e i 270°</i>	42
2.11	<i>Caso di differenza delle direzioni dei venti tra i 270° e i 360°</i>	43
2.12	<i>Coefficiente di spinta in funzione dell'Advance ratio</i>	46
2.13	<i>Mappa iterativa</i>	48
2.14	<i>Coefficiente di potenza in funzione dell'Advance ratio</i>	49
2.15	<i>Rendimento dell'elica in funzione dell'Advance ratio</i>	50
3.1	<i>Tabella dei risultati nel giorno 03/01/2020</i>	52

3.2	<i>Variazione della spinta</i>	53
3.3	<i>Variazione della potenza</i>	54
3.4	<i>Variazione del diametro delle pale</i>	54
3.5	<i>Variazione della spinta d'estate a diverse lunghezze della corda</i>	55
3.6	<i>Variazione della potenza d'estate a diverse lunghezze della corda</i>	55
3.7	<i>Variazione del diametro della pala a diverse lunghezze della corda</i>	56
3.8	<i>Variazione della spinta d'estate a diverse lunghezze della corda</i>	57
3.9	<i>Variazione della potenza d'estate a diverse lunghezze della corda</i>	58
3.10	<i>Variazione del diametro delle pale a diverse lunghezze della corda</i>	58
3.11	<i>Variazione della quota del pallone a diverse lunghezze della corda</i>	59
3.12	<i>Variazione della componente parallela del vento con corda di 20 metri</i>	60
3.13	<i>Variazione della componente parallela del vento con corda di 300 metri</i>	61
3.14	<i>Variazione della componente parallela del vento con corda di 1000 metri</i>	61
3.15	<i>Variazione della componente ortogonale del vento</i>	62
3.16	<i>Tabella di confronto con le altre piattaforme stratosferiche</i>	64
3.17	<i>Vista frontale di un caso favorevole</i>	68
3.18	<i>Vista dall'alto di un caso favorevole</i>	69
3.19	<i>Vista frontale di un caso sfavorevole</i>	70
3.20	<i>Vista dall'alto di un caso sfavorevole</i>	71
4.1	<i>Consumi della strumentazione di bordo</i>	74
4.2	<i>Variazione della declinazione solare</i>	79
4.3	<i>Variazione dell'irraggiamento extraterrestre</i>	80
4.4	<i>Equazione del tempo</i>	81
4.5	<i>Posizione del Sole rispetto ad un punto</i>	82
4.6	<i>Posizione del Sole durante l'equinozio di primavera.</i>	83
4.7	<i>Posizione del Sole durante il solstizio d'estate.</i>	83
4.8	<i>Posizione del Sole durante l'equinozio d'autunno.</i>	84
4.9	<i>Posizione del Sole durante il solstizio d'inverno.</i>	84
4.10	<i>Immagine di riferimento sulle variazioni del Sole</i>	86
4.11	<i>Esempio di impiego dei pannelli fotovoltaici su un UAV</i>	95
4.12	<i>Esempio di impiego di un antenna Rectenna</i>	96
4.13	<i>Caratterizzazione del campo in relazione alla distanza dalla sorgente</i>	97
4.14	<i>Pallone convergente per la generazione di energia</i>	100

4.15	<i>Pallone con pannelli solari sulla superficie</i>	102
5.1	<i>Una futura azione di salvataggio</i>	105

Elenco delle tabelle

1.1	Specifiche Zephyr	14
1.2	Specifiche Phantom Works	15
1.3	Specifiche Solara 50	16
1.4	Specifiche Silent Falcon	20
1.5	Specifiche Silent Falcon	21
1.6	Specifiche HALE-D	23
1.7	Specifiche Stratobus	24
3.1	Pallone riempito a elio e numero di pale pari a 4	63
3.2	Risultati di media tra tutte le simulazioni realizzate	63
3.3	Pallone riempito a idrogeno e numero di pale pari a 4	64
3.4	Risultati di media tra tutte le simulazioni realizzate	64
3.5	Pallone riempito a elio e numero di pale pari a 12	66
3.6	Risultati di media tra tutte le simulazioni realizzate	66
3.7	Pallone riempito a idrogeno e numero di pale pari a 12	67
3.8	Risultati di media tra tutte le simulazioni realizzate	67
4.1	Potenza richiesta dai motori	74
4.2	Consumi dei motori	75
4.3	Potenza richiesta dall'intera piattaforma	76
4.4	Durata della missione	76
4.5	Risultati trattazione sulla variazione dell'irraggiamento solare	87
4.6	Batteria necessaria per completare un'intera missione notturna	88
4.7	Potenza solare richiesta per 24 ore	91
4.8	Potenza solare richiesta per le ore diurne	91
4.9	Potenza solare richiesta per le ore notturne	91
4.10	Superficie pannelli solari per le 24 ore	93
4.11	Superficie pannelli solari per le sole ore diurne	93
4.12	Superficie pannelli solari per le sole ore notturne	93
4.13	Superficie pannelli solari per le 24 ore	94
4.14	Superficie pannelli solari per le sole ore diurne	94

4.15	Superficie pannelli solari per le sole ore notturne	94
4.16	Potenza da trasmettere	99

Capitolo 1

Introduzione

Per piattaforma stratosferica si intende una piattaforma-aeromobile che possa operare nell'atmosfera al di sopra delle attuali quote massime di volo (<18 Km) e possa portare un payload per gli usi e i fini più differenti quali, ad esempio, l'osservazione del territorio, le telecomunicazioni, l'ausilio alla navigazione di precisione o la meteorologia spaziale.

Caratteristica saliente delle piattaforme stratosferiche è l'alta quota e la persistenza su uno stesso punto o su una stessa area per periodi molto lunghi, anche mesi.

Giusto per dare un parametro qualitativo, una piattaforma, che stazioni a circa 20 km di quota, potrebbe coprire un'area di circa 500 km di raggio. Anche con una sola piattaforma attiva si potrebbe coprire un territorio vasto come la Sicilia e il mare circostante; altrimenti, con un paio di esse in volo, a pochi chilometri a sud dell'isola, si potrebbe sorvegliare il tratto di mare di competenza dell'Operazione Sophia, l'operazione militare di sicurezza marittima europea che opera nel Mediterraneo centrale per contrastare il traffico illecito di esseri umani, sino alle coste libiche.

1.1 L'ambiente in cui operano

Attorno ai 20 km di quota, nei cosiddetti "spazi aerei non controllati", ben al di sopra delle rotte degli aeromobili commerciali e quindi in zone relativamente "libere", la densità dell'aria è estremamente ridotta (circa 1/15 di quella a livello del mare) e le temperature sono molto basse (circa -50°C).

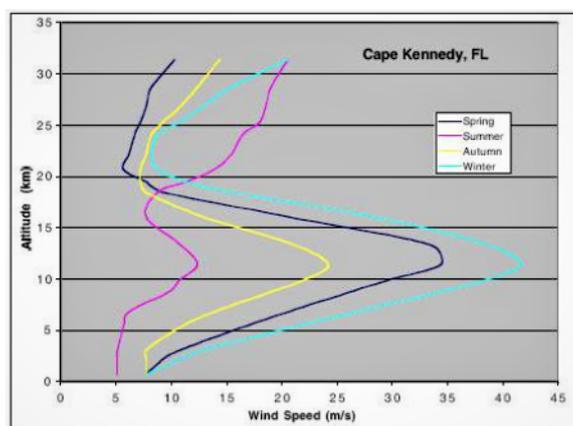


Figura 1.1: Venti medi per Cape Kennedy, FL, durante tutto l'anno

I venti sono nell'ordine di 30-90 km/h, mentre l'esposizione alle radiazioni ionizzanti è rilevante. Un ambiente indubbiamente ostile per il volo e per i materiali, in generale basti pensare che un pallone costituito di un materiale polimerico elastico, gonfiato con un metro cubo di elio al suolo, si espanderebbe fino a diventare grande come una stanza, una volta salito a quota stratosferica. Facile immaginare lo stress del film di rivestimento. Anche la propulsione non è semplice: i motori a scoppio tradizionali smetterebbero di funzionare a causa delle basse temperature e della carenza d'ossigeno.

Non va, infine, sottovalutato che una delle condizioni essenziali per garantire la persistenza di un velivolo a tale quota e per far funzionare il payload, è la disponibilità di energia elettrica a bordo e, quindi, la disponibilità di pannelli solari flessibili e di accumulatori efficienti e resistenti a queste condizioni.

Tutto ciò pone delle sfide tecnologiche notevoli che, allo stato attuale, possono essere affrontate efficacemente solo dalla ricerca applicativa avanzata.

1.2 Perché vengono definite High Altitude Pseudo-Satellite (HAPS)

Le piattaforme stratosferiche ereditano i punti di forza dei satelliti e degli aeromobili a pilotaggio remoto, cercando di correggere e superare le rispettive limitazioni. In particolar modo:

- *I satelliti in orbita geostazionaria sono in grado di fissare lo stesso punto, ma hanno risoluzioni tendenzialmente più basse.*
- *Un satellite in orbita bassa osserva la Terra con una maggiore risoluzione, ma passa pochi minuti al giorno sullo stesso punto e non si adatta a situazioni che richiedono un monitoraggio continuativo.*
- *In entrambi i casi, i tempi di sviluppo richiedono anni, mentre le possibilità di manutenzione sono più che limitate.*
- *Gli aeromobili a pilotaggio remoto, invece, hanno la possibilità di mantenere una posizione stazionaria, a quote inferiori e con l'ulteriore vantaggio di poter garantire risoluzioni migliori e latenze inferiori, ma a costo di un notevole dispendio energetico che ne inficia l'impiego per periodi prolungati.*

Da parte loro, le piattaforme stratosferiche, stazionando a quote che si aggirano intorno ai 20 chilometri, potrebbero in futuro arrivare a mantenersi in aria per mesi, monitorando a lungo lo stesso punto con risoluzioni elevate, conservando sia tempi di sviluppo (e costi) ridotti a qualche mese sia l'opportunità di manutenzioni accessibili.

1.3 Le soluzioni già esistenti

Fino al 2013, la tecnologia dei droni o UAV era principalmente di dominio dell'industria della difesa. Tuttavia, nei 2 anni successivi si sono viste piccole aziende private, grandi aziende tecnologiche e aeronautiche entrare in questo nuovo mercato, tant'è vero che, proprio in questo momento, ci sono più di una dozzina di società tecnologiche e aeronautiche che lavorano intensamente allo sviluppo di piattaforme ad energia solare. Eccone una panoramica:

- **Le piattaforme più pesanti dell'aria**

- **Zephyr 8**



Figura 1.2: Airbus Zephyr 8

Zephyr è un UAV pseudo satellite ad alta quota (HAPS) che funziona esclusivamente con energia solare. Si è evoluto negli anni con diversi modelli, infatti Airbus sta attualmente lavorando su Zephyr 8.

Dal 2014 Airbus ha continuato a sviluppare lo Zephyr e a battere i record.

Nel settembre 2014 lo Zephyr è diventato il primo UAV in assoluto ad eseguire un volo autorizzato da un'autorità civile.

L'azienda mira alla piena commercializzazione dello Zephyr come alternativa ai satelliti e sta prendendo di mira diverse applicazioni con il suo drone, tra cui immagini Full HD, immagini termiche, la creazione di reti di comunicazione temporanee e il supporto dei servizi di emergenza.

Tabella 1.1: Specifiche Zephyr

Apertura alare	28 metri
Altitudine	circa 21.000 metri
Velocità di crociera	55 km/h
PV	silicio amorfo
Batterie	litio-zolfo (Zephyr 7)
Motori elettrici	2 x motori elettrici da 450 Watt (Zephyr 7)
Carico utile	5-10 kg
Peso	60 kg

– Boeing Phantom Works



Figura 1.3: Boeing Phantom Works - Solar Eagle

Boeing Solar Eagle (Vulture II) è un veicolo aereo senza pilota a energia solare (UAV). La particolarità di questo drone risiede nella possibilità di rimanere in volo per oltre 5 anni e, quindi, è considerato un aereo ad alta quota e a lunga durata (HALE).

Tabella 1.2: Specifiche Phantom Works

Apertura alare	120 metri
Velocità di crociera	<80 km/h
PV	5 kW

– Google (Titan Aerospace)



Figura 1.4: Google - Titan Aerospace - Solara 50

Google è entrata nel business dei droni a energia solare con l'acquisizione di Titan Aerospace, un produttore di UAV a energia solare ad alta quota e a lunga durata (HALE) nell'aprile 2014. Titan Aerospace ha sviluppato droni chiamati Solara 50 e Solara 60 in grado di volare a un'altitudine di 20 km per periodi impressionanti di oltre 5 anni. Quel periodo è una stima, tuttavia a queste altitudini ce ne sono pochi che possono disturbare un aereo per continuare il suo percorso costante nell'aria.

Tabella 1.3: Specifiche Solara 50

Apertura alare	60 metri
Velocità di crociera	105 km/h
PV	3000 celle solari (7 kW)
Lanciare	con una catapulta

– Facebook (Ascenta)



Figura 1.5: Facebook - connectivity lab - drone a energia solare

Facebook è stato coinvolto nella tecnologia dei droni ad energia solare con l'acquisizione di Ascenta, con sede nel Regno Unito, nel marzo 2014.

Il Connectivity Lab di Facebook si impegna con internet.org a costruire droni, satelliti e laser per fornire Internet a tutti, indipendentemente dal fatto che si viva in una città del mondo o in un'area remota di un Paese in via di sviluppo.

Connectivity Labs ritiene che i satelliti saranno più adatti per luoghi remoti con bassa popolazione che vive su vaste aree. Internet può essere trasmesso da più satelliti in orbita bassa, fornendo una copertura continua.

Per le aree più densamente popolate come città, villaggi e aree suburbane, Connectivity Labs utilizzerà droni ad energia solare (UAV) ad alta quota. Questi droni alimentati da fotovoltaico gireranno a 20.000 metri di altitudine, ben al di sopra delle compagnie aeree commerciali, lontano da condizioni meteorologiche avverse e trasmetteranno Internet ad alta velocità.

I sistemi di comunicazione laser di nuova concezione possono trasmettere dati dal cielo alle comunità.

– **AeroVironment / NASA**

AeroVironment, il principale fornitore di piccoli droni del Pentagono, ha un impressionante portafoglio di UAV:

* NASA Pathfinder (Plus)



Figura 1.6: AeroVironment - Pathfinder

NASA Pathfinder e Pathfinder Plus sono entrambi UAV completamente alimentati a energia solare. I droni sono stati costruiti da AeroVironment come parte del programma ERAST della NASA. L'obiettivo principale della costruzione di entrambi gli UAV a energia solare era quello di sviluppare le tecnologie per consentire agli aerei a lungo termine e ad alta quota di fungere da "satelliti atmosferici".

Il Pathfinder Plus è stato successivamente evoluto nell'UAV a energia solare Centurion e Helios della NASA.

* NASA Helios



Figura 1.7: NASA / AeroVironment - Helios

L'ultimo veicolo aereo senza pilota a energia solare sviluppato da AeroVironment per la NASA è l'Helios. Questo drone a energia solare si è evoluto dal Pathfinder all'Helios, un satellite atmosferico ad alta quota a lungo termine.

L'Helios è stato costruito con due obiettivi precisi:

- Volo sostenuto ad altitudini intorno ai 30.000 metri.*
- Vola per almeno 24 ore, comprese 14 ore sopra i 15.000 metri.*

– **Silent Falcon UAV**



Figura 1.8: *Silent Falcon - UAV*

Bye Aerospace assiste Silent Falcon UAS Technologies con la progettazione, la ricerca e il supporto ingegneristico dell'UAV Silent Falcon.

Il Silent Falcon è un piccolo UAV ad energia solare con accumulatore di batteria. Il drone è alimentato con pannelli solari fotovoltaici a film sottile e trasporta un sistema di propulsione a 6 pale.

Tabella 1.4: Specifiche Silent Falcon

Apertura alare	4,27 metri
Lunghezza	2 metri
Peso	13,5 kg
Resistenza	fino a 7+ ore in condizioni ottimali
PV	Ascent Solar Thin Film Fotovoltaico
Batteria	Batteria agli ioni di litio
Gamma	fino a 100 km
Avvio e ripristino	Lancio della catapulta, recupero del paracadute

– Atlantik Solar



Figura 1.9: Atlantik Solar - UAV

Atlantik Solar è diretto dall'Autonomous Systems Lab dell'ETH di Zurigo. L'azienda ha sviluppato un drone autonomo a energia solare (UAV) con un'apertura alare di 5,6 metri che può volare fino a 10 giorni ininterrottamente.

Atlantik Solar sta tentando di "attraversare l'Oceano Atlantico con uno" sciame "di 4 UAV entro la fine di giugno 2015, attraversando 5000 km di distanza di volo durante 7 giorni di duro ambiente atlantico con venti e temporali potenzialmente forti".

Tabella 1.5: Specifiche Silent Falcon

Apertura alare	5,6 metri
Massa	6,3 kg
Struttura	leggera in fibra di carbonio e kevlar
Sistema di alimentazione	1,4 m ² di pannelli solari
Sistema di accumulo dell'energia	batterie agli ioni di litio
Carico utile	fotocamera digitale HD
Sistema di lancio	lanciabile a mano

- Le piattaforme più leggere dell'aria

- Lockheed Martin (Hale-D)



Figura 1.10: Lockheed Martin - HALE-D

L' HALE-D, ovvero High Altitude Long Endurance-Demonstrator, è un UAV a energia solare telecomandato progettato da Lockheed Martin per galleggiare sopra la corrente a getto a 18.000 metri. Questo veicolo, senza pilota e più leggero dell'aria, opera sopra la corrente a getto in una posizione geostazionaria e funziona come una piattaforma di sorveglianza, un relè di telecomunicazioni o un osservatore meteorologico.

Allo stesso tempo, l'HALE-D può essere utilizzato nel settore della difesa come una piattaforma di intelligence e sorveglianza sempre presente, che offre connettività di comunicazione rapida su tutto lo spazio di battaglia.

Tabella 1.6: Specifiche HALE-D

Volume scafo	14000 m^3
Lunghezza	73 metri
Diametro	21 metri
Motori di propulsione	2 kW elettrico
Accumulo di energia	Batteria agli ioni di litio da 40 kWh
Matrice solare	Film sottile da 15 kW
Velocità di crociera	37 km/h
Altitudine di mantenimento della stazione	20.000 metri
Peso del carico utile	23 kg
Potenza di carico utile	500 Watt
Recuperabile	sì
Riutilizzabile	sì

– Thales Group (Stratobus)



Figura 1.11: Thales Group - Stratobus)

Lo Stratobus di Thales Alenia Space è un dirigibile stratosferico autonomo appartenente alla categoria HAPS (High Altitude Platform System), che opera a un'altitudine di 20 chilometri. Offrendo una copertura regionale continua, si adatta perfettamente alle soluzioni satellitari.

Lo Stratobus può trasportare payload per la sorveglianza delle frontiere e dei siti di elevato valore a terra o sul mare (come la videosorveglianza delle piattaforme offshore), la sicurezza (lotta al terrorismo, al traffico di droga, ecc.), il monitoraggio ambientale (incendi boschivi, erosione delle spiagge, inquinamento, ecc.) e le comunicazioni (internet, 5G).

La piattaforma, dotata di 1.000 metri quadrati di pannelli solari, è progettata per svolgere fino a 5 anni di missione.

Tabella 1.7: Specifiche Stratobus

Lunghezza	115 metri
Diametro	34 metri
Motori di propulsione	5 kW elettrico
Altitudine di mantenimento della stazione	20.000 metri
Peso del carico utile	250 kg

– Google (Loon)



Figura 1.12: The Loon Balloon flight system

I palloncini Loon sono progettati e realizzati per resistere alle dure condizioni della stratosfera, dove i venti possono soffiare oltre i 100 km/h e le temperature possono scendere fino a -90°C .

Il Loon Flight System è costituito da tre sistemi separati, ovvero l'involucro del pallone, il bus e il carico utile. Insieme, lavorano perfettamente per fornire sollevamento, monitorare la telemetria di volo e fornire connettività.

Loon collabora con una rete di partner in tutto il mondo per identificare zone di atterraggio predefinite. Le discese sono coordinate con il controllo del traffico aereo locale e i sistemi di volo atterrano in sicurezza in queste zone preselezionate. Le squadre di recupero a terra raccolgono quindi le attrezzature per il riutilizzo e il riciclaggio.

Loon ha compiuto progressi significativi nei due aspetti più importanti, infatti può sia rimanere nella stratosfera per centinaia di giorni sia rimanere in uno spazio specifico abbastanza a lungo da fornire una copertura significativa.

Quest'ultima piattaforma presentata, per quanto ben diversa dalle precedenti, sarà quella da cui verrà presa maggiore ispirazione, in questo studio, per la realizzazione di una configurazione rivoluzionaria in questo settore.

Capitolo 2

Una nuova configurazione

Una soluzione ancora alternativa sarà oggetto di questo studio e, nello specifico, prevede l'utilizzo di un pallone aerostatico, riempito con un gas più leggero dell'aria, come elio o idrogeno, che garantisca il sollevamento da terra di se stesso, della strumentazione utile di bordo ad esso agganciata e di un piccolo drone ad ala fissa, legato tramite una corda di lunghezza variabile.

Il compito del pallone sarà quello di trasportare tutto il peso del sistema fino alla quota della stratosfera, mentre il compito del drone sarà quello di trainare il pallone, contrastando i venti e impedendo che la piattaforma fuoriesca dalla quota e posizione desiderate.

La stazionarietà sopra un punto fisso verrà, quindi, garantita come segue:

- *La forza ascensionale del pallone verrà contrastata dalla deportanza generata dall'ala del drone.*
- *La resistenza con l'aria di entrambi gli oggetti verrà contrastata dalla sola spinta orizzontale generata dal sistema propulsivo del drone.*

L'obiettivo di questo studio prevede di realizzare una piattaforma con un payload molto leggero, in accordo con la normativa di riferimento dei "light unmanned free balloons" [42], di circa 3-4 Kg, e di analizzare quali potrebbero essere le spinte e le potenze necessarie per contrastare i differenti venti agenti sia sul pallone sia sul drone.

CHARACTERISTICS		PAYLOAD MASS (kilogrammes)					
		1	2	3	4	5	6 or more
ROPE or OTHER SUSPENSION 230 Newtons or MORE		HEAVY					
INDIVIDUAL PAYLOAD PACKAGE	AREA DENSITY more than 13 g/cm ²						
<div style="border: 1px dashed black; padding: 2px; display: inline-block;"> AREA DENSITY CALCULATION $\frac{\text{MASS (g)}}{\text{Area of smallest surface (cm}^2\text{)}}$ </div>		AREA DENSITY less than 13 g/cm ²		MEDIUM			
COMBINED MASS (if Suspension OR Area density OR Mass of individual package are not factors)		LIGHT					

Figura 2.1: *Suddivisione tra light, medium e heavy balloons*

Uno schema di riferimento della soluzione descritta verrà presentato di seguito:

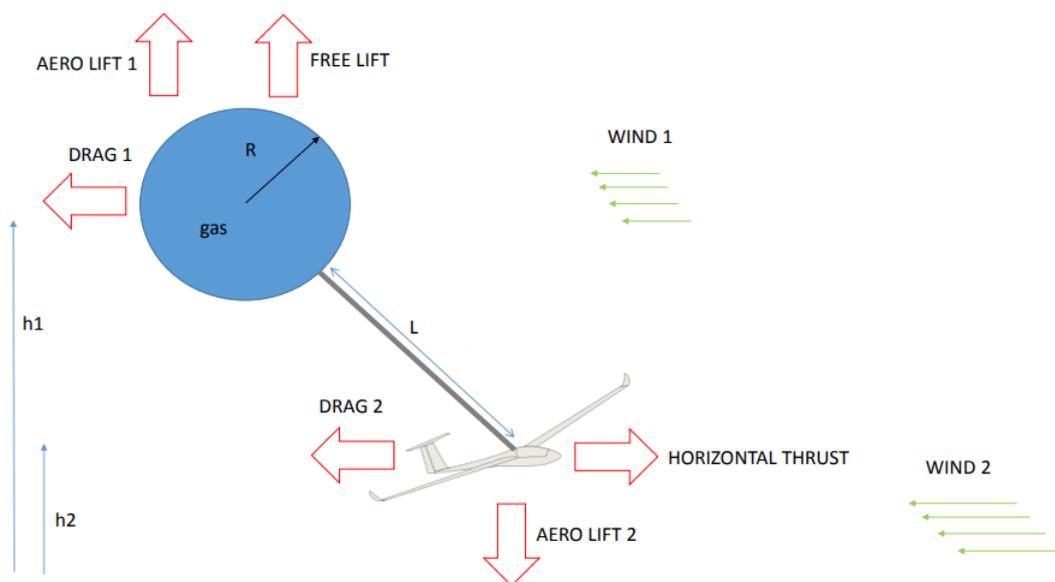


Figura 2.2: Schema di riferimento

Il sistema rappresentato è strettamente connesso ma, per spiegare nel dettaglio tutti i fenomeni fisici che agiscono su di esso, verrà momentaneamente analizzato in tre parti distinte:

Forze agenti sul pallone:

- *Il pallone, rivestito in lattice, è riempito con un gas più leggero dell'aria, come elio o idrogeno, su cui agirà una prima forza di sollevamento, detta "free lift".*

Questa spinta, unica dei palloni aerostatici, è la risultante della spinta di Archimede, tipica di un corpo immerso in un fluido che riceve una spinta (detta forza di galleggiamento) verticale (dal basso verso l'alto), di intensità pari al peso di una massa di fluido di volume uguale a quella della parte immersa del corpo, meno la forza peso dell'intero sistema (data dalla somma della massa del pallone, della strumentazione di bordo e del drone).

Quest'ultima, consente al sistema di salire in poco tempo (circa 15 minuti), subito dopo il lancio, fino alle quote desiderate.

- *Una seconda forza di sollevamento, detta portanza aerodinamica, sarà generata dal moto orizzontale del vento che inciderà sul pallone.*

Quest'ultima, sarà strettamente legata all'intensità del vento e all'inclinazione che il pallone stesso assumerà rispetto al drone che lo trascina.

- *Infine, ci sarà una forza di resistenza dell'aria dovuta all'intensità dei venti che agiscono sul pallone.*

Quest'ultima, sarà anche legata al volume del pallone, il quale, espandendosi per mezzo del gas interno e della sempre più bassa pressione esterna, tenderà ad aumentare all'aumentare della quota di volo.

Forze agenti sulla corda

La corda è il mezzo attraverso cui viene mantenuta la connessione tra il pallone e il drone e il suo scopo è quello di favorire il bilanciamento delle forze tra i due oggetti. In particolare, divideremo la tensione che si genera sulla corda in due componenti:

- *Una componente verticale che dovrà bilanciare la "free lift" e la portanza aerodinamica del pallone da un estremo e la deportanza del drone dall'altro.*
- *Una componente orizzontale che dovrà bilanciare la forza resistente del pallone da un estremo e la spinta orizzontale e la resistenza del drone dall'altro.*

Forze agenti sul drone

- *Per contrastare la componente verticale della tensione e, di conseguenza, anche il sollevamento del pallone, il drone dovrà generare una forza deportante, attraverso l'ala, che metta in equilibrio il sistema lungo l'asse verticale.*
- *Per contrastare la componente orizzontale della tensione e, di conseguenza, anche la forza resistente del pallone e la resistenza generata dal drone stesso con l'aria, quest'ultimo dovrà generare una sufficiente spinta orizzontale che metta in equilibrio il sistema lungo l'asse orizzontale.*

L'obiettivo di questa prima parte di studio sarà proprio quello di calcolare i valori di tali forze in gioco, nelle diverse condizioni ambientali che, giorno per giorno, si presenteranno lungo un intero anno solare.

2.1 Trattazione Fisico - Matematica

Riprendendo lo schema di riferimento precedente, si evidenziano le simbologie, relative a tutte le forze in campo, che verranno, per questa trattazione, adottate:

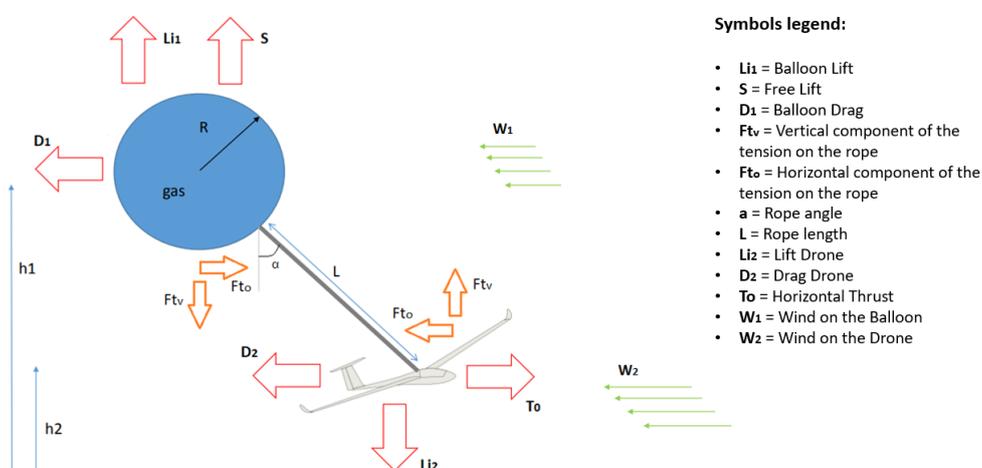


Figura 2.3: Schema di riferimento con relative forze in gioco

Possiamo ricavare due equazioni per ognuna delle due direzioni:

Lungo la direzione verticale del pallone:

$$Li_1 + S - F_{tv} = 0 \quad (2.1)$$

Lungo la direzione verticale del drone:

$$L_{i_2} - F_{t_v} = 0 \quad (2.2)$$

Lungo la direzione orizzontale del pallone:

$$D_1 - F_{t_o} = 0 \quad (2.3)$$

Lungo la direzione orizzontale del drone:

$$T_0 - D_2 - F_{t_o} = 0 \quad (2.4)$$

A queste, si aggiunge una quinta equazione, ottenuta tramite ragionamenti trigonometrici:

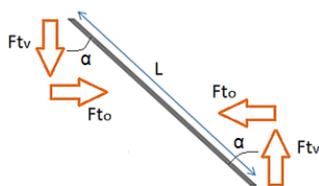


Figura 2.4: Forze agenti sulla corda

$$\alpha = \arctan\left(\frac{F_{t_o}}{F_{t_v}}\right) \quad (2.5)$$

Dal sito di meteorologia [43] verrà selezionato il radio sondaggio di Cuneo, da cui ricaveremo i parametri iniziali di pressione (P_a) e temperatura (T_a), a determinate altitudini, necessari per calcolare la densità (ρ_a) dell'aria tramite la legge dei gas perfetti:

$$\rho_a = \frac{P_a \cdot M_a}{R \cdot T_a} \quad (2.6)$$

dove:

- $R = 8,314 \frac{J}{mol \cdot K} =$ Costante dei gas.
- $M_a = 0,02896 \frac{Kg}{mol} =$ Massa molecolare dell'aria.

Allo stesso modo, si può calcolare la densità (ρ_g) del gas all'interno del pallone, considerando di mantenere la stessa pressione e temperatura dell'aria:

$$\rho_g = \frac{P_a \cdot M_g}{R \cdot T_a} = \rho_a \cdot \frac{M_g}{M_a} \quad (2.7)$$

Per M_g possiamo prendere in considerazione due tipi di gas:

- $M_g = 0,004002 \frac{Kg}{mol} =$ Massa molecolare dell'elio.
- $M_g = 0,002016 \frac{Kg}{mol} =$ Massa molecolare dell'idrogeno.

entrambe le densità sono ricavate in $\frac{Kg}{m^3}$.

Stabilendo una percentuale (f) arbitraria di "free lift" (S) [44], si impone quanto la spinta di Archimede debba essere superiore alla forza peso del sistema e, quindi, quanto velocemente il pallone debba salire.

Di conseguenza, si può calcolare la "free lift" (S) stessa, come:

$$S = m_G \cdot f \cdot g \quad (2.8)$$

dove:

- m_G , ovvero la massa lorda, data dal peso del pallone, del payload e del drone, si aggira intorno ai $6 \div 8 \text{ Kg}$.
- f , ovvero la percentuale di "free lift", è imposta pari al 10%.
- g , ovvero l'accelerazione di gravità, è leggermente inferiore al valore a livello del mare ed esprimibile come: $9,81 \cdot \left(1 - \frac{\text{Quota del Pallone}}{\text{Raggio della Terra}}\right)$.

La formula per calcolare la "free lift" (S) si ricava come differenza tra la spinta di Archimede, generata dal gas leggero, e la forza peso del sistema stesso [46, 47]:

$$S = V \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g - m_G \cdot g \quad (2.9)$$

Uguagliandola a (2.8) e ribaltandola, si ottiene il volume del pallone $V [m^3]$.

Conoscendo il volume del pallone, si ricava il suo raggio:

$$r = \left(\frac{3 \cdot V}{4 \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.10)$$

E la sua superficie massima, approssimandola a quella di una sfera:

$$A_1 = \pi \cdot r^2 \quad (2.11)$$

Sostituendo con i rispettivi parametri nell'equazione (2.1) e (2.3), si ottiene:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \rho_{a_1} \cdot W_1^2 \cdot A_1 \cdot cl_1 + V \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g - m_G \cdot g - F_{t_v} = 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \rho_{a_1} \cdot V_1^2 \cdot A_1 \cdot cd_1 - F_{t_o} = 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

Dove cl_1 e cd_1 sono rispettivamente i coefficienti di portanza e resistenza, relativi al solo pallone, e sono al momento incogniti.

Mentre ρ_{a_1} e W_1 sono rispettivamente la densità dell'aria all'altitudine del pallone e la velocità del vento che incide su quest'ultimo.

Imponendo un primo valore di " α ", che rappresenta sia l'angolo di inclinazione della corda sia l'angolo di inclinazione dell'intero pallone, possiamo entrare nel seguente grafico:

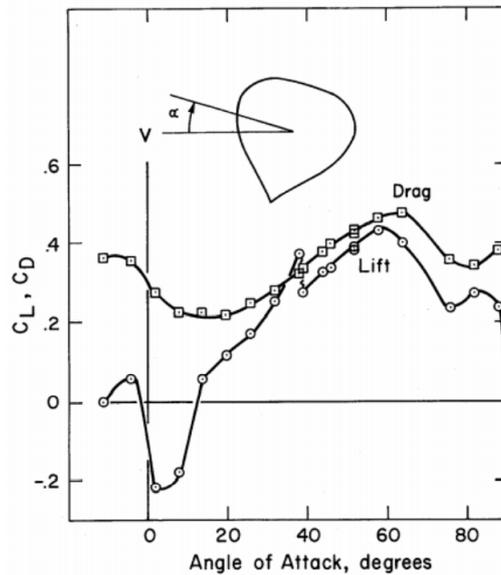


Figura 2.5: Relazione tra coefficienti aerodinamici ed inclinazione del pallone.

e trovare così i valori di cl_1 e cd_1 .

Successivamente, ricavando le componenti della tensione F_{t_o} e F_{t_v} dalle precedenti formule (2.1) e (2.3), è possibile ricalcolare il valore di " α ", attraverso la formula (2.5).

Dopo aver trovato l'esatto valore di " α ", possiamo ricavare il valore della lunghezza della corda (L), dato da:

$$L = \frac{h_1 - h_2}{\cos(\alpha)} \quad (2.13)$$

Dove h_1 e h_2 sono le rispettive altitudini del pallone e del drone.

Questo valore della corda (L) sarà confrontato con quello imposto a priori, verificando che coincida. Qualora non dovesse essere così, si inserirà il nuovo valore di inclinazione della corda (α), ricavato da (2.5) nelle formule, instaurando in questo modo un processo iterativo.

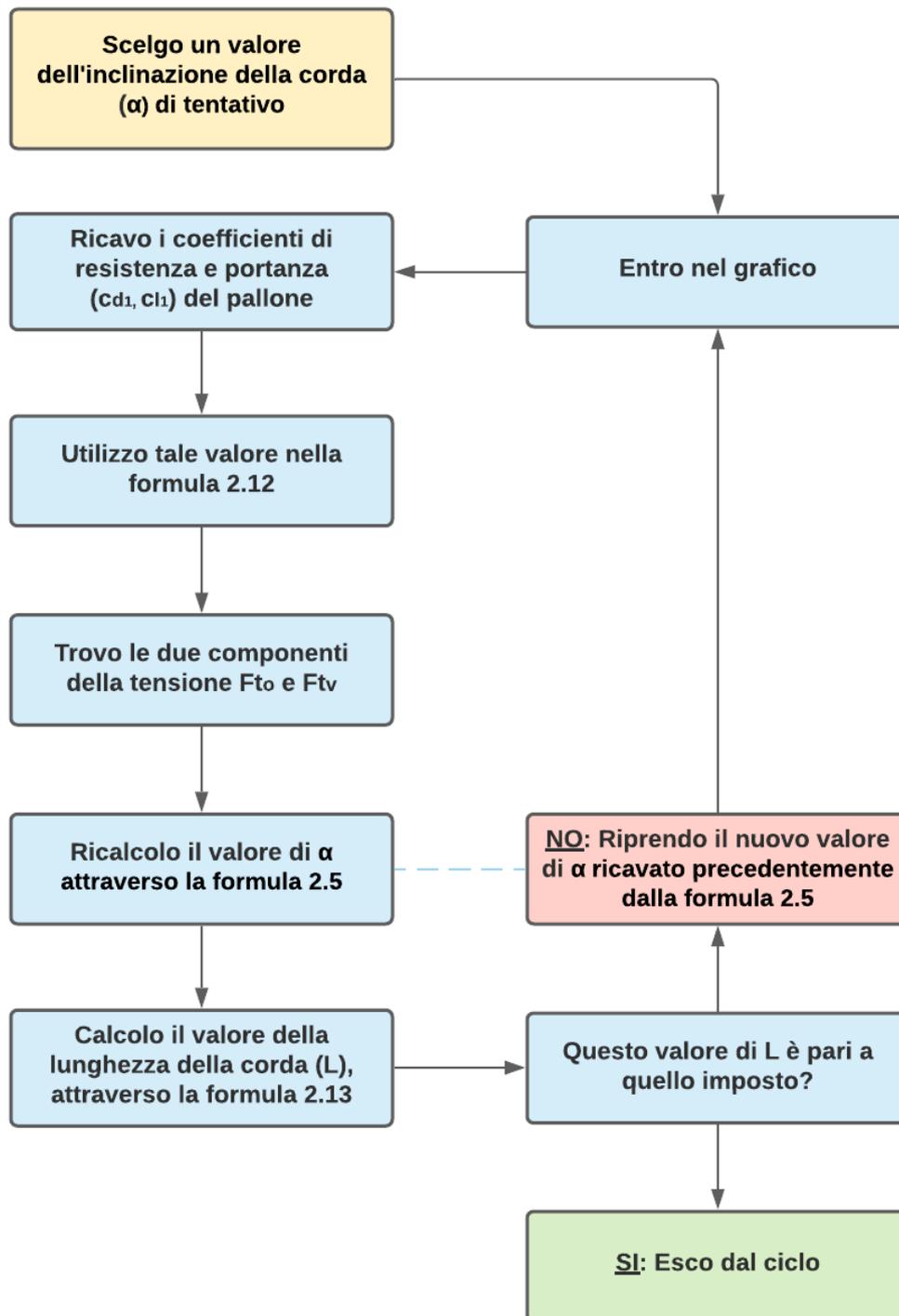


Figura 2.6: Mappa iterativa

2.2 Studio della direzione dei venti

La configurazione della piattaforma stratosferica, adottata in questo studio, prevede di collegare un pallone e un drone tramite una corda, ma di posizionarli a quote diverse. Ciò include, quindi, di avere sui due oggetti due condizioni ambientali diverse e, di conseguenza, alcuni parametri come temperatura, pressione e densità dell'aria varieranno a seconda della quota di posizionamento.

Un ulteriore criterio che varierà tra una quota e l'altra sarà il vento e, in particolare, la sua intensità e direzione.

Sarà quindi necessario approfondire questa tematica, analizzando tutti i casi possibili in cui la direzione dei venti che incidono sul pallone e sul drone varî, tenendo presente che uno dei primi vantaggi nell'impiego del drone stesso sarà proprio la possibilità di modificare il proprio assetto, posizionandosi nel verso in cui soffia il vento, per generare così una minore resistenza.

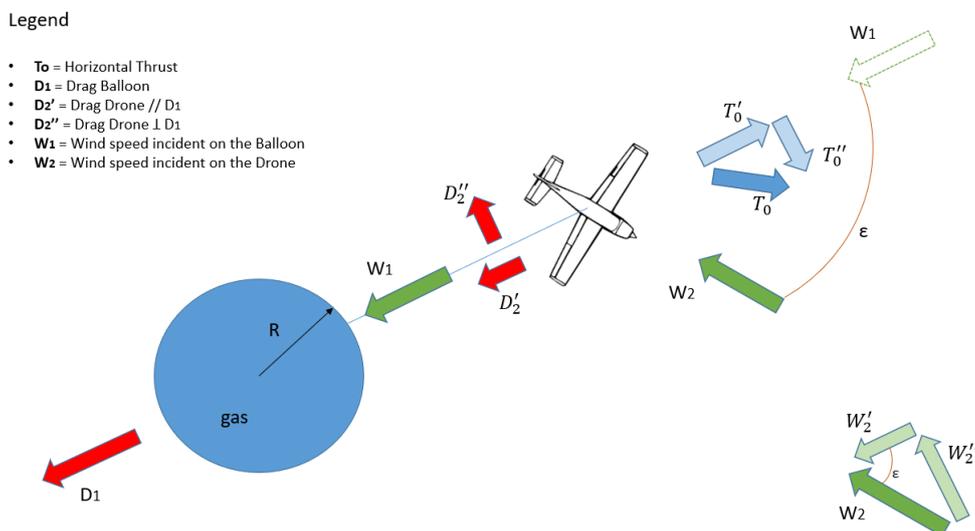


Figura 2.7: Schema dei venti con visuale dall'alto

In questo schema, per tenere in considerazione le diverse direzioni dei venti, è stata scomposta la velocità del vento (W_2) incidente sul drone in:

- W_2' , componente parallela al vento (W_1) incidente sul pallone.
- W_2'' , componente ortogonale al vento (W_1) incidente sul pallone.

La scomposizione della velocità (W_2) genererà due forme di resistenza:

- Una resistenza D_2' nella direzione parallela a D_1 , il cui verso dipenderà dalla direzione dei venti e dall'angolo (ϵ), e calcolabile come:

$$D_2' = \frac{1}{2} \cdot \rho_{a_2} \cdot W_2' \cdot \cos(\epsilon) \cdot c_{d_2} \cdot A_2 \quad (2.14)$$

- Una resistenza D_2'' nella direzione ortogonale a D_1 , il cui verso dipenderà dalla direzione dei venti e dall'angolo (ϵ), e calcolabile come:

$$D_2'' = \frac{1}{2} \cdot \rho_{a_2} \cdot W_2'' \cdot \cos(\epsilon) \cdot c_{d_2} \cdot A_2 \quad (2.15)$$

In cui c_{d_2} rappresenta per entrambi il coefficiente di resistenza del drone, che per semplicità imporrò uguale a 0,022.

Sostituendo adeguatamente le due componenti della resistenza (D_2') e (D_2'') nell'equazione (2.4), si ricavano le due componenti della spinta orizzontale (T_0') e (T_0''), la cui somma vettoriale fornisce il valore esatto della spinta orizzontale (T_0) necessaria.

Per calcolare i corretti valori di T_0' e T_0'' , bisogna analizzare i vari casi, generati dalle diverse direzioni dei venti e dagli angoli formati tra di loro:

- Nel primo caso avremo che la differenza delle direzioni dei due venti sarà minore di 90° :

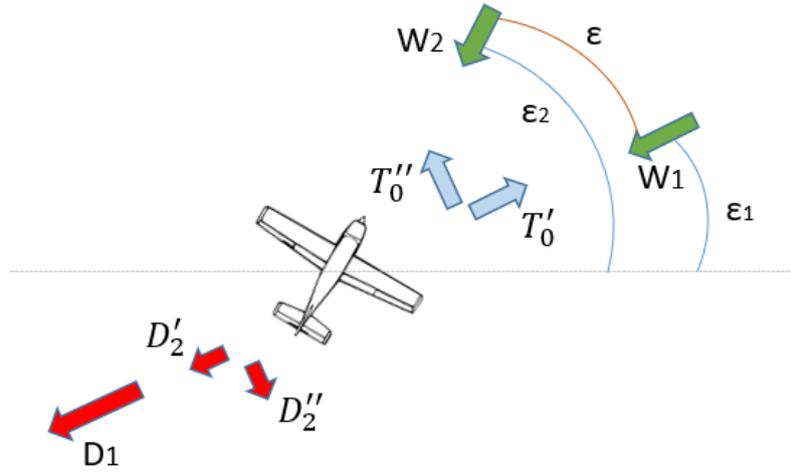
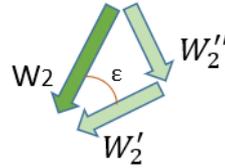


Figura 2.8: Caso di differenza delle direzioni dei venti minore di 90°

Da cui si ricavano le due componenti del vento W_2 incidenti sul drone:

$$\begin{cases} W_2' = W_2 \cdot \cos(\epsilon) \\ W_2'' = W_2 \cdot \sin(\epsilon) \end{cases} \quad (2.16)$$



Infine, si ricavano le due componenti della spinta orizzontale:

$$\begin{cases} T_0' = D_1 + D_2' = F_{t_0} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{a_2} \cdot (W_2')^2 \cdot c_{d_2} \cdot A_2 \\ T_0'' = D_2'' = \frac{1}{2} \cdot \rho_{a_2} \cdot (W_2'')^2 \cdot c_{d_2} \cdot A_2 \end{cases} \quad (2.17)$$

- Nel secondo caso avremo che la differenza delle direzioni dei due venti sarà maggiore di 90° e minore di 180° :

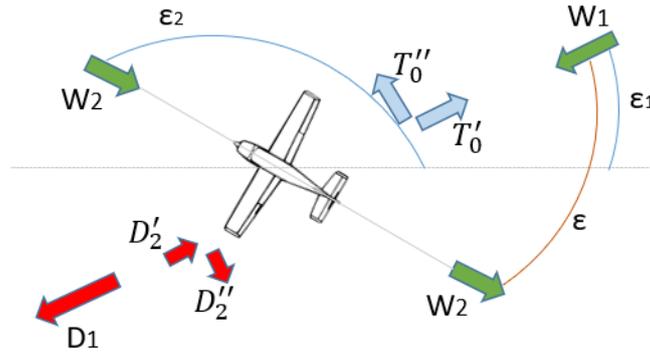
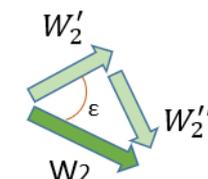


Figura 2.9: Caso di differenza delle direzioni dei venti tra i 90° e i 180°

Da cui si ricavano le due componenti del vento W_2 incidenti sul drone:

$$\begin{cases} W_2' = W_2 \cdot \cos(\epsilon) \\ W_2'' = W_2 \cdot \sin(\epsilon) \end{cases} \quad (2.18)$$


Infine, si ricavano le due componenti della spinta orizzontale:

$$\begin{cases} T_0' = D_1 - D_2' = F_{t_0} - \frac{1}{2} \cdot \rho_{a_2} \cdot (W_2')^2 \cdot c_{d_2} \cdot A_2 \\ T_0'' = D_2'' = \frac{1}{2} \cdot \rho_{a_2} \cdot (W_2'')^2 \cdot c_{d_2} \cdot A_2 \end{cases} \quad (2.19)$$

- Nel terzo caso avremo che la differenza delle direzioni dei due venti sarà maggiore di 180° e minore di 270° :

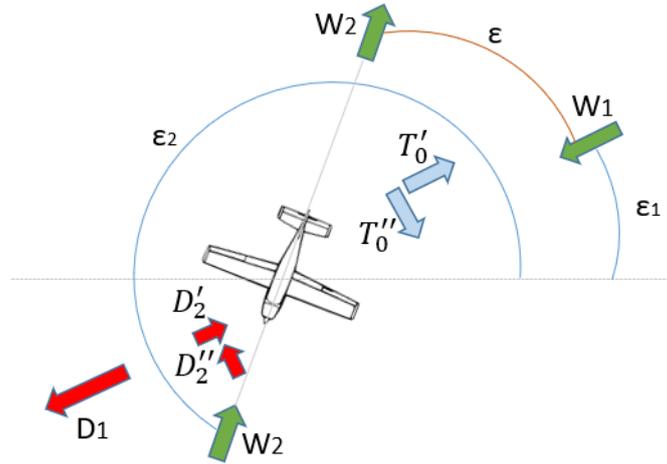
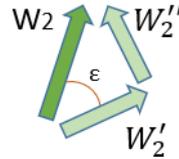


Figura 2.10: Caso di differenza delle direzioni dei venti tra i 180° e i 270°

Da cui si ricavano le due componenti del vento W_2 incidenti sul drone:

$$\begin{cases} W_2' = W_2 \cdot \cos(\epsilon) \\ W_2'' = W_2 \cdot \sin(\epsilon) \end{cases} \quad (2.20)$$



Infine, si ricavano le due componenti della spinta orizzontale:

$$\begin{cases} T_0' = D_1 - D_2' = F_{t_0} - \frac{1}{2} \cdot \rho_{a_2} \cdot (W_2')^2 \cdot c_{d_2} \cdot A_2 \\ T_0'' = D_2'' = \frac{1}{2} \cdot \rho_{a_2} \cdot (W_2'')^2 \cdot c_{d_2} \cdot A_2 \end{cases} \quad (2.21)$$

- Nel quarto caso avremo che la differenza delle direzioni dei due venti sarà maggiore di 270° e minore di 360° :

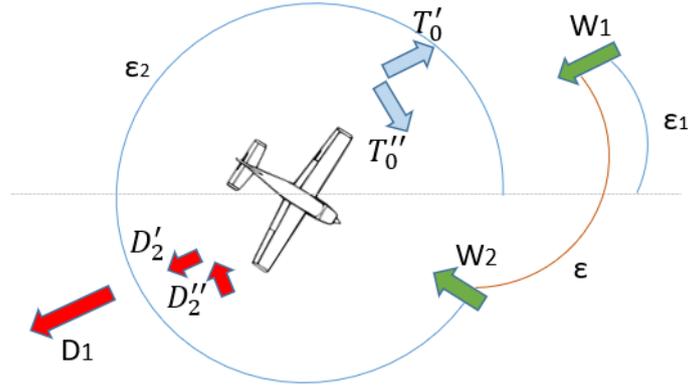


Figura 2.11: Caso di differenza delle direzioni dei venti tra i 270° e i 360°

Da cui si ricavano le due componenti del vento W_2 incidenti sul drone:

$$\begin{cases} W_2' = W_2 \cdot \cos(\epsilon) \\ W_2'' = W_2 \cdot \sin(\epsilon) \end{cases} \quad (2.22)$$

Infine, si ricavano le due componenti della spinta orizzontale:

$$\begin{cases} T_0' = D_1 - D_2' = F_{t0} - \frac{1}{2} \cdot \rho_{a2} \cdot (W_2')^2 \cdot c_{d2} \cdot A_2 \\ T_0'' = D_2'' = \frac{1}{2} \cdot \rho_{a2} \cdot (W_2'')^2 \cdot c_{d2} \cdot A_2 \end{cases} \quad (2.23)$$

Dall'analisi effettuata si evince come, in alcuni casi, la differenza tra le direzioni dei venti compresa tra i 90° e i 270° porti ad avere delle componenti di resistenza (D'_2) sul drone con verso opposto alla resistenza che si genera sul pallone (D_1).

Questo è un importante risultato perché comporta che la resistenza che si genera sul drone può, a volte, diventare un contributo e favorire l'impiego di una spinta orizzontale minore per contrastare la resistenza generata dal pallone.

Con i valori esatti delle componenti orizzontali (F_{t_0}) e verticali (F_{t_v}) della tensione, è possibile usufruire dell'equazione (2.2) e, ribaltandola, trovare il valore incognito della superficie alare del drone (A_2):

$$A_2 = \frac{F_{t_v}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{a_2} \cdot (W'_2)^2 \cdot c_{l_2}} \quad (2.24)$$

W'_2 e ρ_{a_2} sono rispettivamente la componente parallela a W_1 della velocità del vento che incide sul drone e la densità dell'aria all'altitudine del drone. Mentre per il parametro c_{l_2} si è inserito un valore mediamente utilizzato, ma attendibile per droni ad ala fissa, di 1,2.

Attraverso l'equazione (2.4), si ricavano le due componenti della spinta orizzontale (T'_0 e T''_0), da cui infine otteniamo la T_0 :

$$T_0 = \sqrt{(T'_0)^2 + (T''_0)^2} \quad (2.25)$$

2.3 Calcolo della potenza meccanica

Dopo aver ricavato il valore della spinta orizzontale necessaria, si passa al calcolo del valore della potenza elettrica necessaria, partendo dalla definizione di due tipi di potenza:

- La potenza disponibile (P_a):

Definita come il prodotto della forza propulsiva o spinta orizzontale (T_0), fornita dal propulsore, per la velocità del vento relativo che incide sul drone, ovvero W_2 .

- La potenza all'albero (P_b):

Definita come prodotto della coppia motrice per la velocità angolare (Ω) dell'elica.

Per legare queste due potenze, introduciamo il rapporto di funzionamento (*Advance ratio*):

$$J = \frac{W_2}{n \cdot D} = \frac{2 \cdot \pi \cdot W_2}{\Omega \cdot D} \quad (2.26)$$

Imponendo un Mach massimo (M) di 0,65, per impedire effetti di comprimibilità sulle pale, ed eguagliandolo al rapporto tra la velocità massima di rotazione della pala e la velocità del suono alla quota del drone:

$$M = \frac{\Omega \cdot R}{V_{suono}} \quad (2.27)$$

Si ricava l'Advance ratio (J) in funzione dei soli parametri relativi alle condizioni ambientali in cui si trova il drone:

$$J = \frac{W_2 \cdot \pi}{M \cdot V_{suono}} \quad (2.28)$$

Volendo ottenere il minor valore della spinta e della potenza necessari, al fine di non dover impiegare motori e pale sovradimensionati, si sceglie di mantenere il valore del calettamento (β) basso e, quindi, pari a 15° . Imposto tale parametro e, conoscendo l'Advance ratio (J), si può entrare nei seguenti grafici per ricavare i coefficienti di spinta (C_T) e potenza (C_P) [12]:

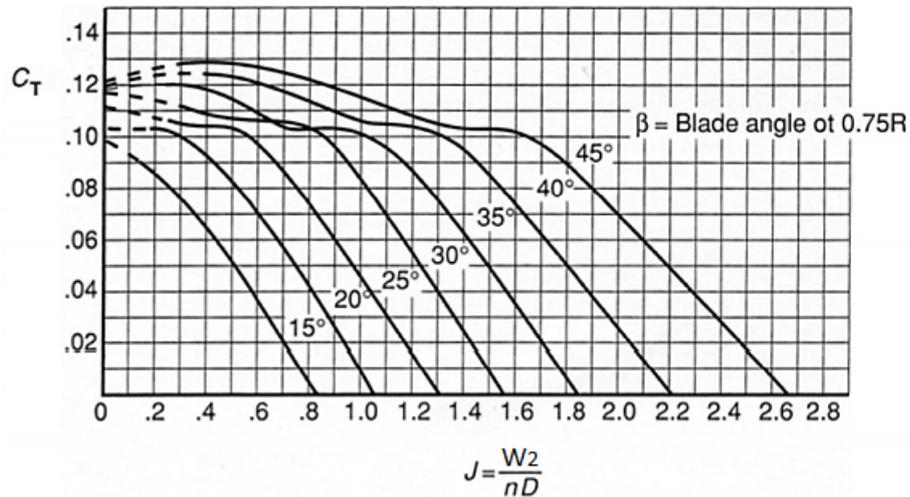


Figura 2.12: Coefficiente di spinta in funzione dell'Advance ratio

Poiché il coefficiente di spinta può anche essere ricavato dalla seguente formula:

$$C_T = \frac{T_0}{N \cdot \rho_{a2} \cdot n^2 \cdot D^4} = \frac{T_0 \cdot \pi}{N \cdot \rho_{a2} \cdot (M \cdot V_{suono})^2 \cdot D^2} \quad (2.29)$$

si ottiene, in questo modo, il diametro (D) della pala, in funzione del numero di pale (N) voluto.

Dopo aver calcolato il diametro, è possibile ricavare il passo della pala:

$$\text{Passo} = \pi \cdot D \cdot \tan(\beta) \quad (2.30)$$

E successivamente anche il numero di giri al minuto (RPM):

$$\text{RPM} = \frac{60 \cdot M \cdot V_{\text{suono}}}{\pi \cdot D} \quad (2.31)$$

Per non ottenere numeri di giri al minuto eccessivamente alti e insostenibili dai motori presenti in commercio, è stato imposto un limite di 10000 RPM per ogni motore.

In questo modo, sarà necessario trovare un compromesso tra il numero di giri al minuto e il Mach massimo, attraverso l'instaurazione di un processo iterativo. Nel caso in cui il numero di giri al minuto ricavato fosse superiore al limite, bisognerebbe abbassare il valore del Mach massimo considerato e ripetere i calcoli effettuati.

Il fine ultimo sarà quello di calcolare, giorno per giorno, il minor valore possibile del diametro (D) delle pale, che meglio si adattano alle condizioni ambientali presenti.

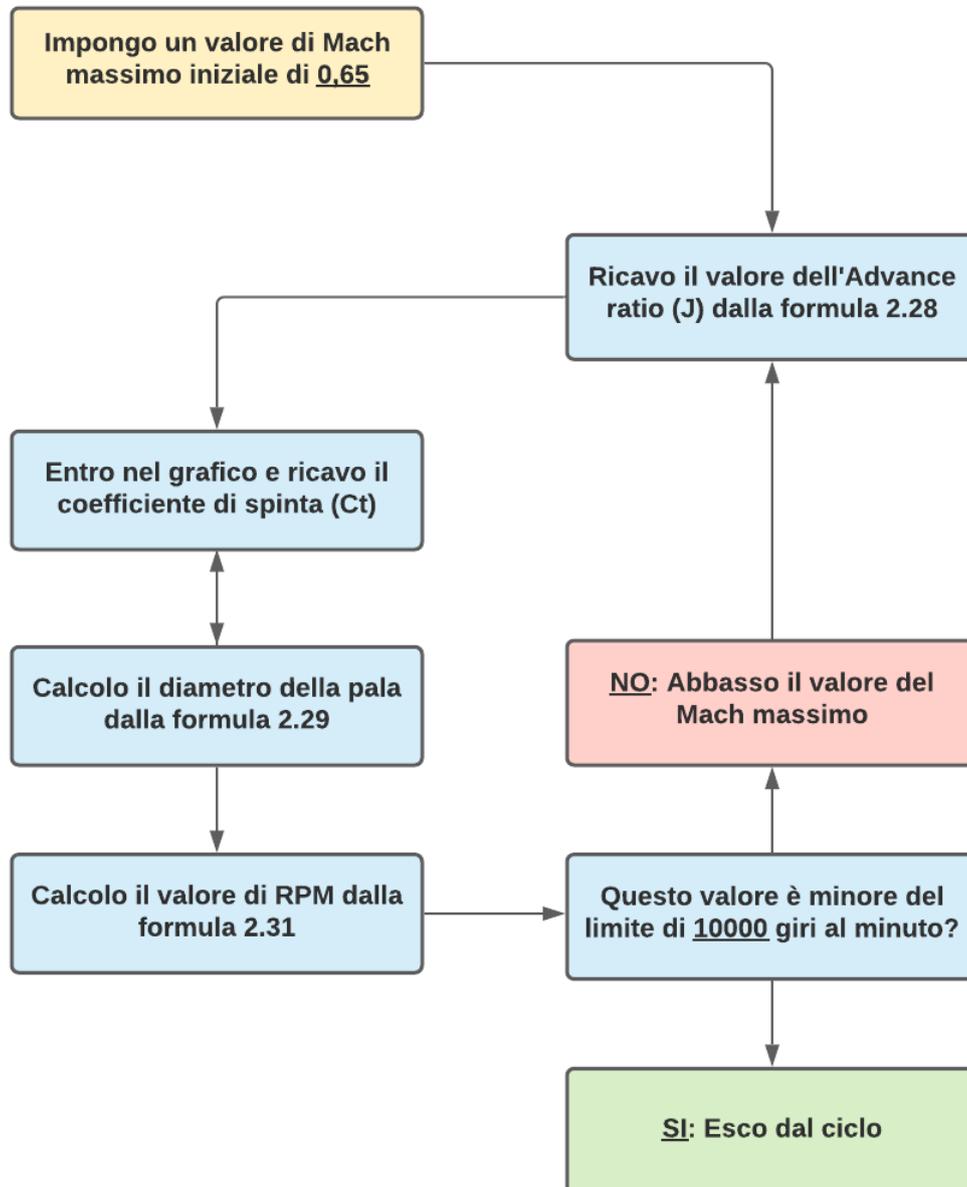


Figura 2.13: *Mappa iterativa*

Nello stesso modo in cui si è proceduto per il coefficiente di spinta, si ricava il coefficiente di potenza:

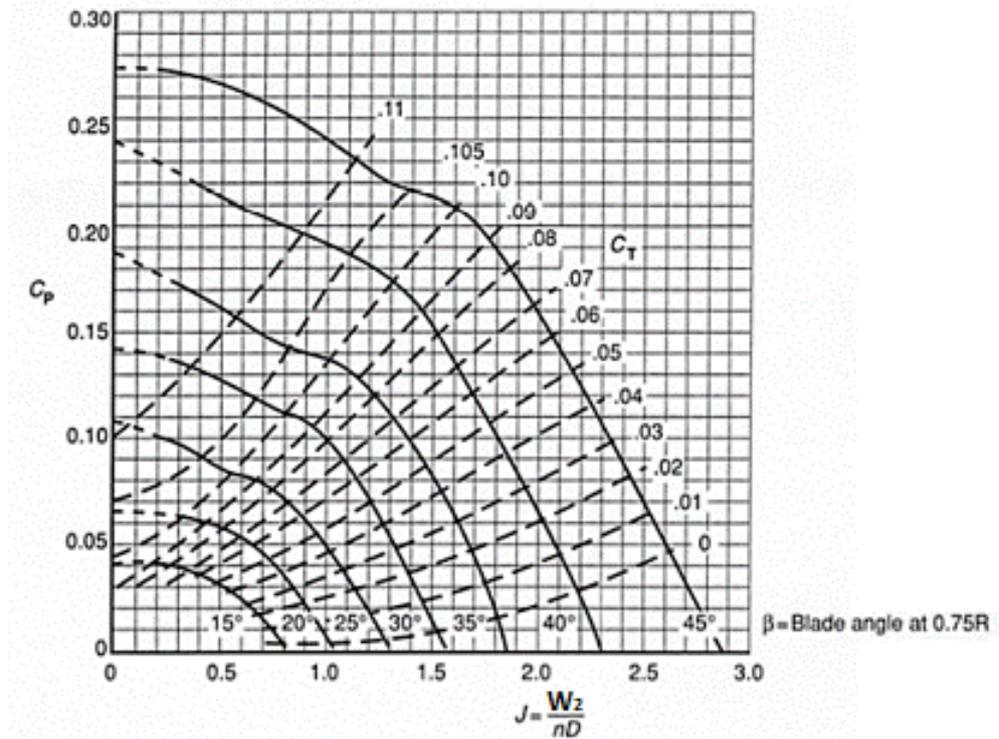


Figura 2.14: Coefficiente di potenza in funzione dell'Advance ratio

Poiché il coefficiente di potenza può anche essere ricavato dalla seguente formula:

$$C_P = \frac{P_b}{N \cdot \rho_{a2} \cdot n^3 \cdot D^5} = \frac{P_b \cdot 8 \cdot \pi^3}{N \cdot \rho_{a2} \cdot (M \cdot V_{suono})^3 \cdot D^2} \quad (2.32)$$

si ottiene, in questo modo, la potenza all'albero (P_b) del sistema propulsivo, nonché la potenza elettrica necessaria.

Infine, è possibile ricavare il rendimento dell'elica tramite più alternative:

- Attraverso la seguente formula:

$$\eta_P = \frac{P_a}{P_b} = J \cdot \frac{C_T}{C_P} \quad (2.33)$$

- Attraverso il seguente grafico:

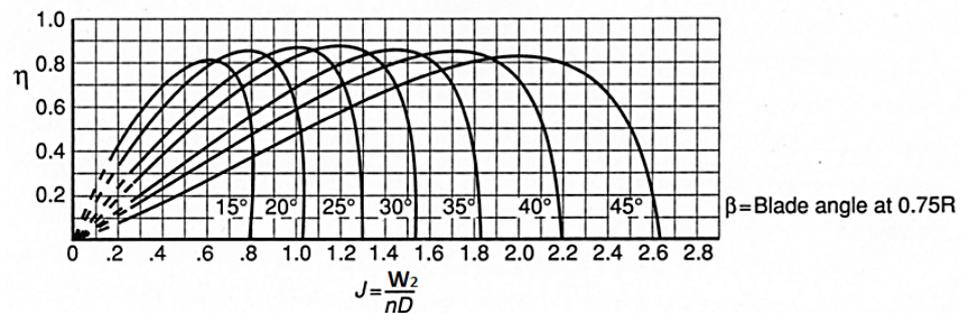


Figura 2.15: Rendimento dell'elica in funzione dell'Advance ratio

Poiché si adotteranno pale commerciali non ottimizzate, per questo studio, il valore di tale rendimento, influenzato dalle condizioni critiche dell'ambiente in cui operano le eliche, sarà notevolmente basso.

Capitolo 3

Presentazione dei risultati

L'applicazione di questa soluzione prevede il posizionamento del pallone ad una quota via via crescente, con il drone posto ad una certa distanza, per verificare come la spinta necessaria cambi, in funzione dei venti che incidono sul sistema pallone-drone.

In particolar modo, ci si aspetta che i casi migliori siano:

- *Le quote in cui le intensità dei venti siano minori.*
- *Le quote in cui la direzione dei venti che incidono sul pallone sia opposta alla direzione dei venti che incidono sul drone.*

Ricavando i dati iniziali (pressione, temperatura e vento) dai radiosondaggi di Cuneo [43], sono state applicate le precedenti formule matematiche all'interno del programma Excel, di cui si riporta, in seguito, una tabella esemplificativa della variazione della spinta nel giorno 03/01/2020.

Poiché la potenza all'albero e il diametro del drone sono fortemente influenzati dalla spinta necessaria, i loro andamenti, di quota in quota, saranno simili.

Nel caso di un sistema pallone-drone di 8 Kg, di una lunghezza della corda pari a 20 metri e di un numero di pale pari 4, i risultati ottenuti saranno i seguenti:

Press.	Quota	Temp.	Direz.	Velocità Vento	Spinta orizz.	Potenza disponibile	Lift pallone	Free lift	Volume	Massa gas	Potenza albero	Rendimento Pala	Diametro Pala
hPa	m	C	deg	Val [knot]	To [N]	Pa [W]	Ll [N]	S [N]	V [m³]	mg [kg]	Pb [W]	n	D [m]
112	15396	-63,4	290	36	236,09	4338,23	195,65	7,81	54,89	8,80	7004,49	0,62	1,12
100	16090	-64,5	305	29	146,92	2197,21	120,54	7,81	61,16	8,80	4065,99	0,54	0,90
94	16469	-64,7	300	25	106,25	1373,99	86,20	7,81	65,00	8,80	2819,67	0,49	0,78
91	16668	-64,7	320	22	80,80	918,93	64,83	7,81	67,14	8,80	2078,09	0,44	0,68
86	17014	-64,9	295	21	71,98	776,19	57,43	7,81	70,98	8,80	1829,40	0,42	0,65
80	17457	-65	330	18	50,79	469,75	39,71	7,80	76,27	8,80	1253,59	0,37	0,56
78	17612	-65,1	310	13	24,17	166,49	18,41	7,80	78,18	8,80	572,47	0,29	0,38
77,8	17628	-65,1	306	14	28,89	194,59	21,91	7,80	78,38	8,80	682,45	0,29	0,42
77	17691	-64,7	290	16	38,83	308,78	29,84	7,80	79,35	8,80	936,90	0,33	0,49
72	18106	-62,2	285	27	113,10	1550,22	91,96	7,80	85,88	8,80	3061,94	0,51	0,92
70,7	18218	-61,5	298	26	103,97	1393,16	84,34	7,80	87,75	8,80	2800,68	0,50	0,89
70	18200	-61,7	305	25	95,58	1238,30	77,22	7,80	88,54	8,80	2551,34	0,49	0,85
69	18369	-61,8	315	26	103,16	1369,23	83,65	7,80	89,78	8,80	2770,74	0,49	0,89
68	18459	-61,9	305	22	72,73	843,85	58,07	7,80	91,06	8,80	1888,95	0,45	0,74
66	18643	-62,2	320	25	93,75	1192,71	75,68	7,80	93,69	8,80	2488,50	0,48	0,87
60,5	19179	-62,9	297	29	123,55	1833,84	100,84	7,80	101,86	8,80	3419,75	0,54	1,06
60	19231	-62,5	295	29	123,12	1836,65	100,48	7,80	102,91	8,80	3414,64	0,54	1,07
57	19549	-60,1	300	36	187,01	3435,08	154,27	7,80	109,56	8,80	5574,88	0,62	1,40
56,2	19636	-59,5	300	33	155,85	2682,48	127,99	7,80	111,43	8,80	4547,36	0,59	1,27
52	20117	-62	300	15	28,86	230,71	21,88	7,80	119,02	8,80	700,82	0,33	0,52
50,2	20335	-63,1	290	18	42,85	392,29	33,14	7,80	122,65	8,80	1060,03	0,37	0,65
50	20360	-62,7	290	19	48,04	455,88	37,43	7,80	123,37	8,80	1195,88	0,38	0,69
47	20741	-62,9	295	27	97,92	1345,80	79,24	7,80	131,12	8,80	2650,22	0,51	1,06
40	21734	-63,5	295	32	111,28	2156,25	107,28	7,79	153,63	8,80	3748,07	0,58	1,37
33	22931	-58,8	270	44	232,96	5253,42	193,02	7,79	190,39	8,80	7498,60	0,70	2,15
32,4	23045	-58,3	273	42	210,66	4576,07	174,32	7,79	194,37	8,80	6691,28	0,68	2,05
31	23323	-58	280	36	151,76	2831,89	124,64	7,79	203,43	8,80	4564,25	0,62	1,71
30	23530	-57,7	260	29	96,27	1458,72	77,99	7,79	210,51	8,80	2704,19	0,54	1,33
26	24430	-57,7	245	45	217,57	5009,00	186,17	7,79	242,89	8,80	7070,07	0,71	2,36
25,9	24454	-57,7	248	45	217,29	5028,65	185,92	7,79	243,83	8,80	7074,94	0,71	2,36
25	24675	-58,1	275	40	169,35	3502,90	144,05	7,79	252,14	8,80	5284,97	0,66	2,06
23	25196	-58,9	260	43	190,67	4210,24	162,62	7,79	273,04	8,80	6088,86	0,69	2,32

Figura 3.1: Tabella dei risultati nel giorno 03/01/2020

Per ottenere la migliore condizione, si prevede di posizionare il pallone alla quota in cui l'intensità dei venti sia la più favorevole possibile.

Successivamente, si posiziona il drone a diverse distanze (corta, media e lunga) dal pallone per verificare quale sia la più vantaggiosa, in termini di combinazione tra densità dell'aria, direzione e intensità dei venti, ottenendo così la spinta orizzontale necessaria minima.

Nell'esempio riportato, la condizione migliore è rappresentata dalla quota di 17612 metri, quota alla quale si ritrova la minore intensità del vento.

3.1 Grafici riassuntivi

Dopo aver individuato la migliore condizione in cui posizionare la piattaforma, in diversi giorni dell'anno, si riportano alcuni grafici che mostrano la variazione dei parametri ricercati durante tutto il 2020.

Per una miglior valutazione di questi grafici, sono stati omessi gli ultimi due giorni di Dicembre, poiché presentavano condizioni ambientali, quali venti superiori ai 20 m/s, che rendevano il mantenimento della posizione tra i 15 e i 25 km dispendioso dal punto di vista energetico e del dimensionamento delle pale.

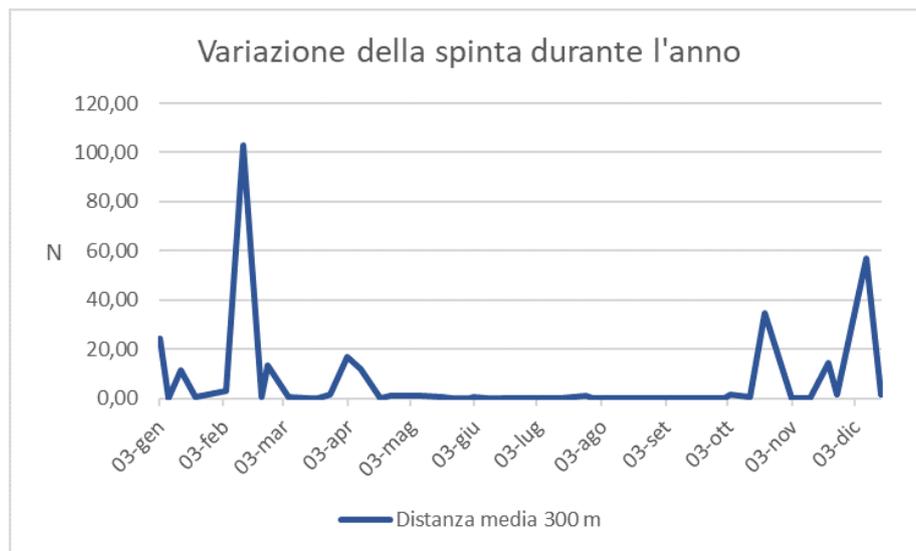


Figura 3.2: *Variazione della spinta*



Figura 3.3: *Variazione della potenza*



Figura 3.4: *Variazione del diametro delle pale*

Pallone riempito ad elio

Per apprezzare meglio le variazioni tra una lunghezza e l'altra della corda tra pallone e drone, nei grafici successivi ci si concentrerà sul solo periodo estivo:

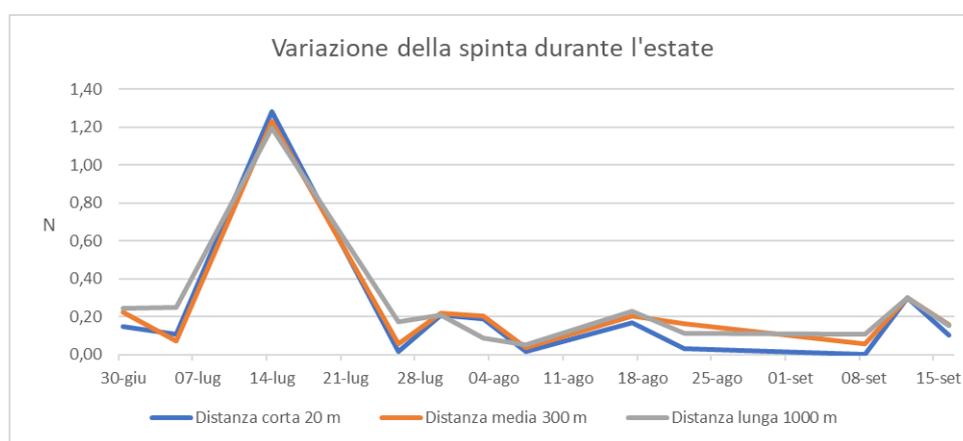


Figura 3.5: *Variazione della spinta d'estate a diverse lunghezze della corda*

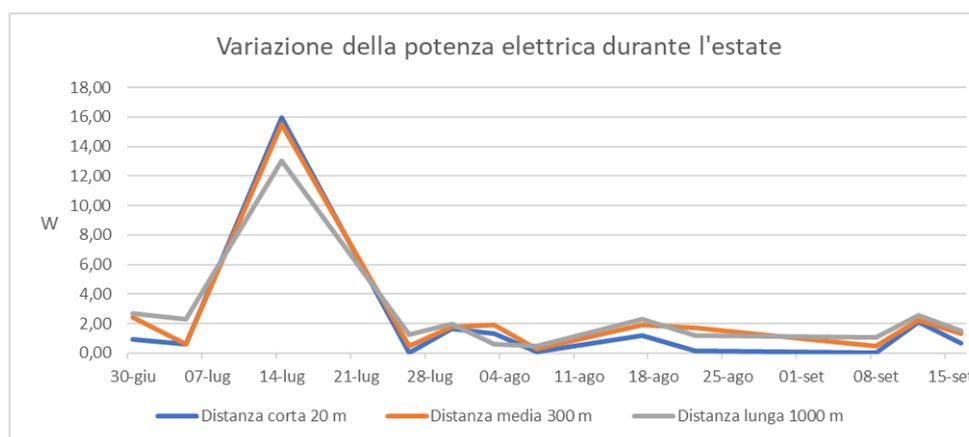


Figura 3.6: *Variazione della potenza d'estate a diverse lunghezze della corda*

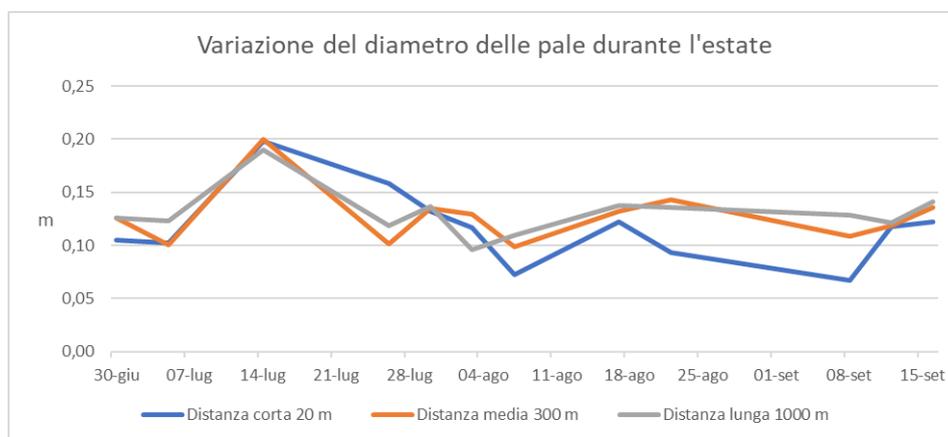


Figura 3.7: *Variazione del diametro della pala a diverse lunghezze della corda*

Dai grafici presentati, si nota come, posizionando il pallone ad una precisa quota, ma variandone il valore della lunghezza della corda e, quindi, la distanza rispetto al drone, nello stesso giorno si possano avere sostanziali differenze di alcuni Watt, per quanto riguarda la potenza elettrica, e di alcuni centimetri, per quanto riguarda il diametro delle pale.

Di giorno in giorno si può pensare, quindi, di variare la lunghezza della corda per raggiungere la miglior condizione possibile.

Pallone riempito ad idrogeno

Ipotizzando di voler impiegare un'altra tipologia di gas all'interno del pallone, come quello dell'idrogeno per esempio, ci sarebbero, in questo caso, alcune lievi variazioni nei valori relativi alle spinte, alle potenze elettriche e ai diametri delle pale.

Tali variazioni non sarebbero visibili su grandi scale annuali, ma si potrebbero apprezzare meglio concentrandosi direttamente sul solo periodo estivo:

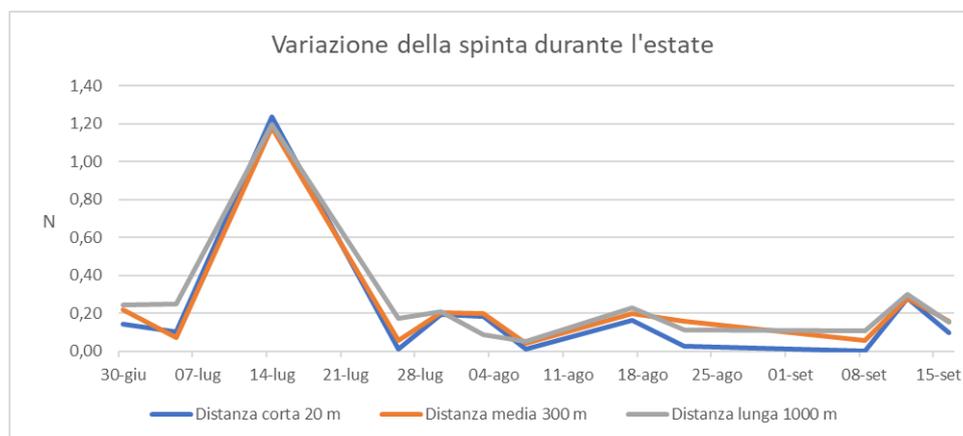


Figura 3.8: *Variazione della spinta d'estate a diverse lunghezze della corda*

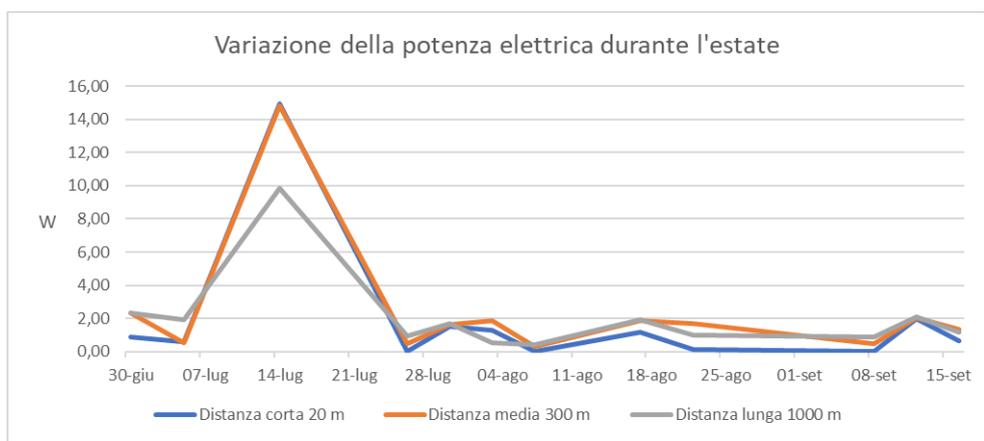


Figura 3.9: *Variazione della potenza d'estate a diverse lunghezze della corda*

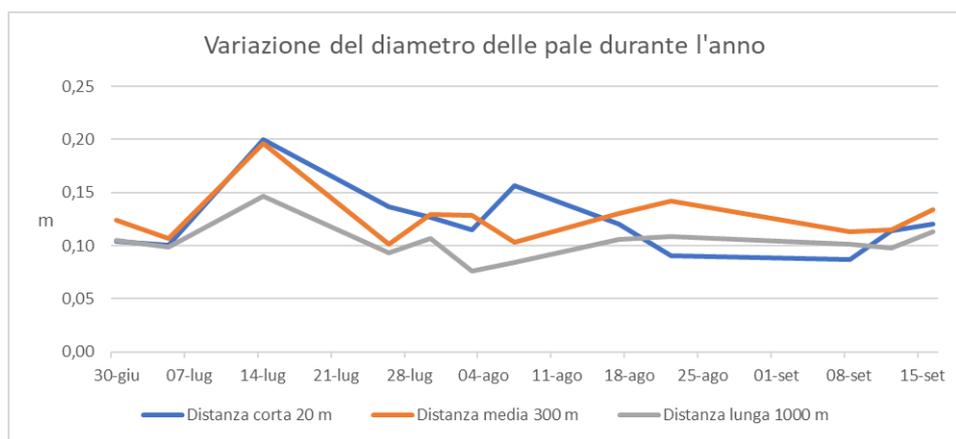


Figura 3.10: *Variazione del diametro delle pale a diverse lunghezze della corda*

Anche qui, di giorno in giorno, si può pensare di variare la lunghezza della corda per raggiungere la miglior condizione possibile.

3.2 Alcune osservazioni interessanti

Dal grafico seguente, si può notare come lungo il periodo annuale la quota ideale in cui posizionare il pallone cambi notevolmente.

Questo significa che la piattaforma deve essere in grado di modificare la propria altitudine, giorno per giorno, mediante il solo azionamento del drone:

- *Se è necessario abbassare la quota, il drone deve inclinare maggiormente verso il basso la propria ala, al fine di generare maggiore deportanza e trainare il pallone verso un'altitudine inferiore.*
- *Se è necessario aumentare la quota, il drone deve inclinare maggiormente verso l'alto la propria ala, al fine di generare minore deportanza, o addirittura della portanza, per favorire il sollevamento del pallone verso un'altitudine superiore.*
- *Se è necessario mantenere stabilmente la stessa quota, il drone deve inclinare la propria ala, al fine di generare una sufficiente deportanza per bilanciare il sollevamento del pallone.*

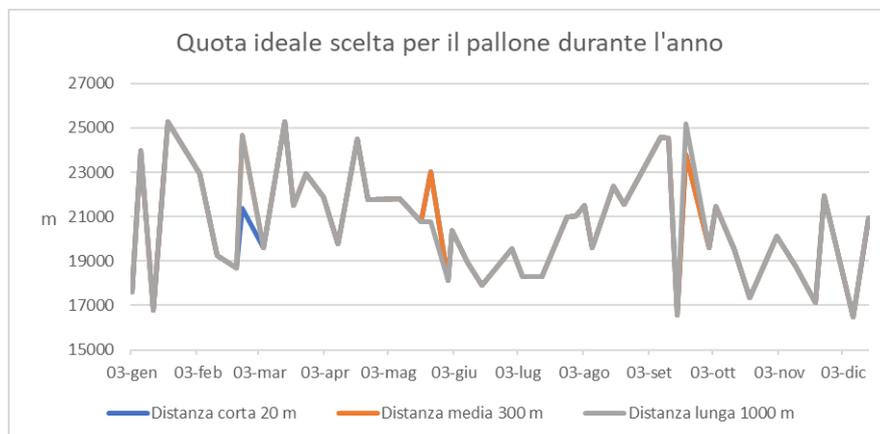


Figura 3.11: *Variazione della quota del pallone a diverse lunghezze della corda*

Inoltre, variando la lunghezza della corda si possono notare alcuni cambiamenti, in determinati giorni, sulla scelta ideale della quota di posizionamento del pallone.

Lungo il periodo annuale, la componente parallela (W_2') del vento che incide sul drone mette in evidenza come, a volte, la direzione del vento sul pallone (W_1) sia opposta a quella sul drone, in questo modo si conferma che la resistenza generatasi sul drone può, in alcuni casi, diventare un contributo e favorire una spinta orizzontale necessaria minore da parte dei motori.

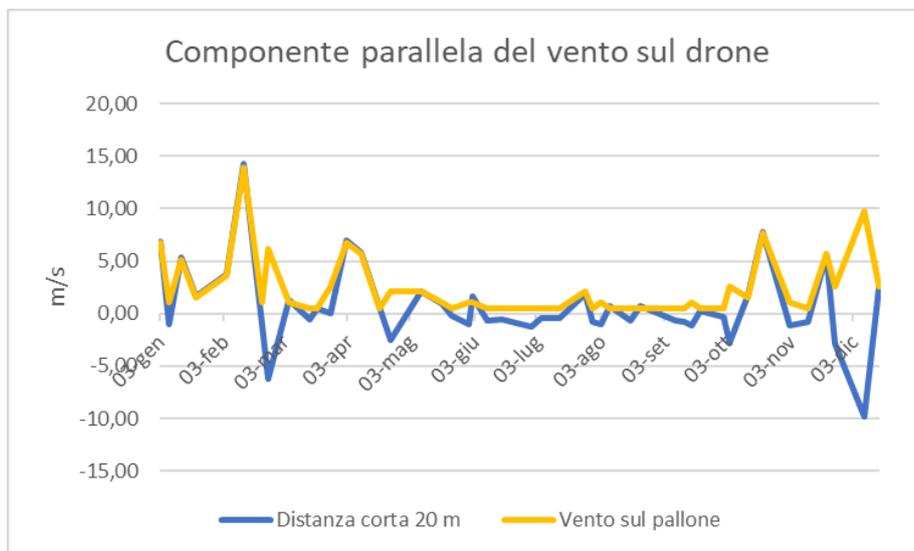


Figura 3.12: Variazione della componente parallela del vento con corda di 20 metri

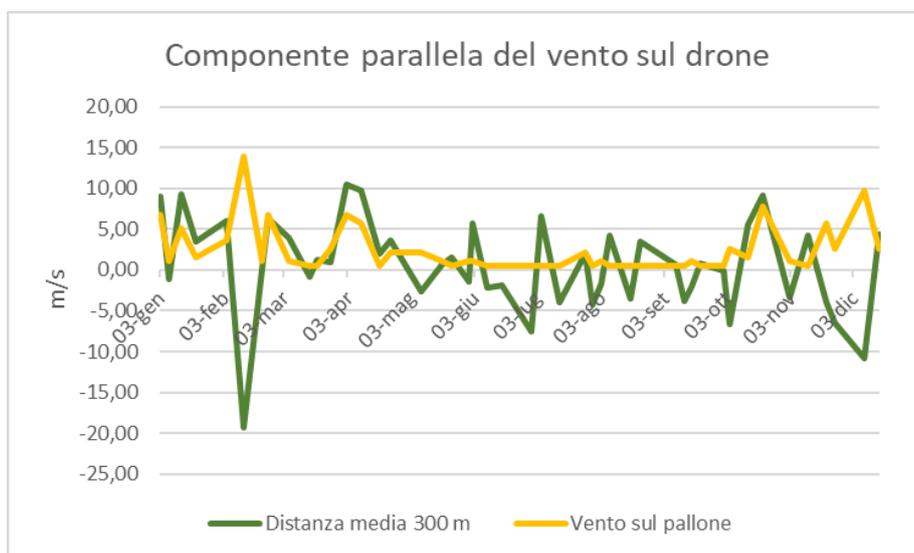


Figura 3.13: *Variazione della componente parallela del vento con corda di 300 metri*

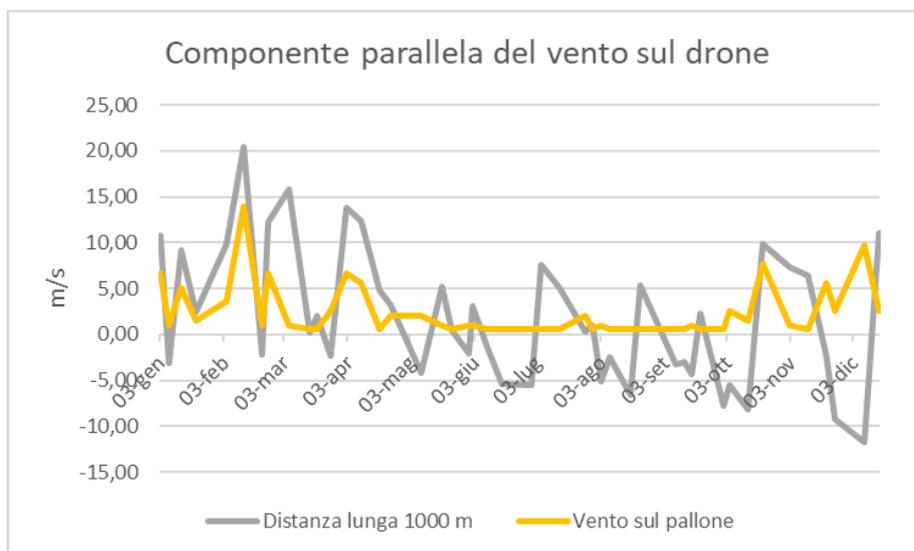


Figura 3.14: *Variazione della componente parallela del vento con corda di 1000 metri*

Lungo il periodo annuale, la componente ortogonale (W_2'') del vento che incide sul drone assume valori positivi e negativi, accentuandosi soprattutto nei casi in cui la distanza tra pallone e drone si incrementa.

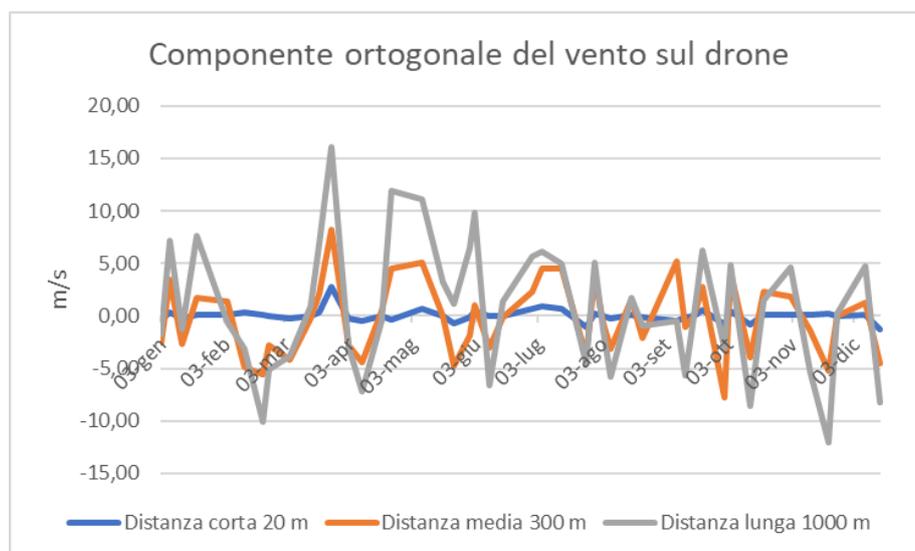


Figura 3.15: Variazione della componente ortogonale del vento

3.3 Tabelle conclusive e confronti

Di seguito sono riportate le tabelle conclusive, ottenute dopo diverse simulazioni fatte ad una distanza della corda via via crescendo e per un pallone posizionato alla quota migliore giorno per giorno:

Tabella 3.1: Pallone riempito a elio e numero di pale pari a 4

Diameter and Pitch (year)	0,26	m	0,22	m
Diameter and Pitch (summer)	0,12	m	0,10	m
Diameter and Pitch (spring)	0,19	m	0,16	m
Diameter and Pitch (autumn)	0,25	m	0,21	m
Diameter and Pitch (winter)	0,47	m	0,40	m

Power (year)	538,53	W
Power (summer)	3,25	W
Power (spring)	66,01	W
Power (autumn)	273,16	W
Power (winter)	1714,12	W

Blade efficiency (year)	0,40
Blade efficiency (summer)	0,40
Blade efficiency (spring)	0,38
Blade efficiency (autumn)	0,42
Blade efficiency (winter)	0,42

Tabella 3.2: Risultati di media tra tutte le simulazioni realizzate

Tabella 3.3: Pallone riempito a idrogeno e numero di pale pari a 4

Diameter and Pitch (year)	0,26	m	0,22	m
Diameter and Pitch (summer)	0,12	m	0,10	m
Diameter and Pitch (spring)	0,19	m	0,16	m
Diameter and Pitch (autumn)	0,25	m	0,21	m
Diameter and Pitch (winter)	0,46	m	0,39	m

Power (year)	509,84	W
Power (summer)	3,09	W
Power (spring)	60,56	W
Power (autumn)	257,08	W
Power (winter)	1625,73	W

Blade efficiency (year)	0,40
Blade efficiency (summer)	0,40
Blade efficiency (spring)	0,38
Blade efficiency (autumn)	0,42
Blade efficiency (winter)	0,42

Tabella 3.4: Risultati di media tra tutte le simulazioni realizzate

Successivamente viene mostrata una tabella di confronto con le potenze elettriche richieste dalle altre soluzioni già presenti in questo campo [9]:

Propulsion system configuration.

Platform	Electric power (kW)	Weight (kg)
HiSentinel80	~1	~500
HALE-D	2	1360
Zephyr S	0.9	65
Cai Hong	2	400
Aquila	2	400
HELIOS	15	1300

Figura 3.16: Tabella di confronto con le altre piattaforme stratosferiche

Nella tabella di confronto le prime due piattaforme rappresentano due dirigibili, mentre le altre quattro degli alianti.

Le prime osservazioni che si possono fare sono le seguenti:

- *Mediamente il sistema pallone-drone mostra dei risultati migliori rispetto alle altre piattaforme esistenti, in particolare durante il periodo estivo in cui la potenza elettrica necessaria è piuttosto bassa (3-4 W).*
- *Tenendo sempre presente che questa soluzione prevede un peso complessivo di 6-8 Kg, quindi di gran lunga inferiore ai pesi delle altre piattaforme, si può sottolineare come questa caratteristica porti ad un notevole risparmio sui costi di produzione, mantenendo comunque un ottimo rapporto tra il carico trasportato e la spesa energetica impiegata.*
- *In un ambiente la cui densità è un quindicesimo di quella a livello del mare, è assolutamente prevedibile che i rendimenti di pale non ottimizzate si abbassino fino al 40%. In futuro, sarà possibile progettare delle pale ottimizzate per la stratosfera e aumentare così i rendimenti delle pale, con conseguente abbassamento della potenza elettrica necessaria.*
- *Il periodo invernale è quello che si dimostra essere il più critico, a causa dei venti notevolmente più intensi, che condizionano sfavorevolmente il livello di potenza elettrica necessaria.
Infatti, anche nei grafici illustrati, questo periodo presentava, in alcuni giorni, dei picchi in cui la potenza elettrica necessaria si incrementava parecchio, rendendo obbligatorio l'impiego di pale dalle dimensioni notevoli e, quindi, oneroso il mantenimento di tale sistema in quota.*

Per ridimensione i valori delle pale, si è svolta una nuova serie di simulazioni che comprendessero un numero di pale maggiore, i cui risultati verranno presentati di seguito:

Tabella 3.5: Pallone riempito a elio e numero di pale pari a 12

Diameter and Pitch (year)	0,19	m	0,16	m
Diameter and Pitch (summer)	0,11	m	0,09	m
Diameter and Pitch (spring)	0,16	m	0,13	m
Diameter and Pitch (autumn)	0,19	m	0,16	m
Diameter and Pitch (winter)	0,30	m	0,26	m

Power (year)	527,02	W
Power (summer)	6,47	W
Power (spring)	55,97	W
Power (autumn)	246,61	W
Power (winter)	1698,07	W

Blade efficiency (year)	0,47
Blade efficiency (summer)	0,47
Blade efficiency (spring)	0,46
Blade efficiency (autumn)	0,49
Blade efficiency (winter)	0,47

Tabella 3.6: Risultati di media tra tutte le simulazioni realizzate

Tabella 3.7: Pallone riempito a idrogeno e numero di pale pari a 12

Diameter and Pitch (year)	0,19	m	0,16	m
Diameter and Pitch (summer)	0,11	m	0,09	m
Diameter and Pitch (spring)	0,15	m	0,13	m
Diameter and Pitch (autumn)	0,19	m	0,16	m
Diameter and Pitch (winter)	0,30	m	0,25	m

Power (year)	498,03	W
Power (summer)	4,83	W
Power (spring)	50,88	W
Power (autumn)	229,82	W
Power (winter)	1610,29	W

Blade efficiency (year)	0,48
Blade efficiency (summer)	0,48
Blade efficiency (spring)	0,46
Blade efficiency (autumn)	0,49
Blade efficiency (winter)	0,48

Tabella 3.8: Risultati di media tra tutte le simulazioni realizzate

Dalle tabelle mostrate, si nota come un aumento del numero di pale porti ad un miglioramento del rendimento e, di conseguenza, ad un tenue abbassamento della potenza elettrica necessaria.

Per quanto riguarda le dimensioni delle pale, si nota che i miglioramenti più significativi ci sono solo nei periodi autunnale e invernale, mentre nei restanti periodi il vantaggio è meno evidente e troppo lieve da poter giustificare un aumento dei pesi e degli ingombri, dato dal maggior numero di pale impiegato.

Questo suggerisce che sia ideale giorno per giorno montare un numero di pale sempre diverso che si adatti meglio alle condizioni ambientali e alla stagione presenti.

3.4 Analisi di alcuni casi particolari

Schema di riferimento delle forze in gioco in un caso favorevole: 17/08/2020

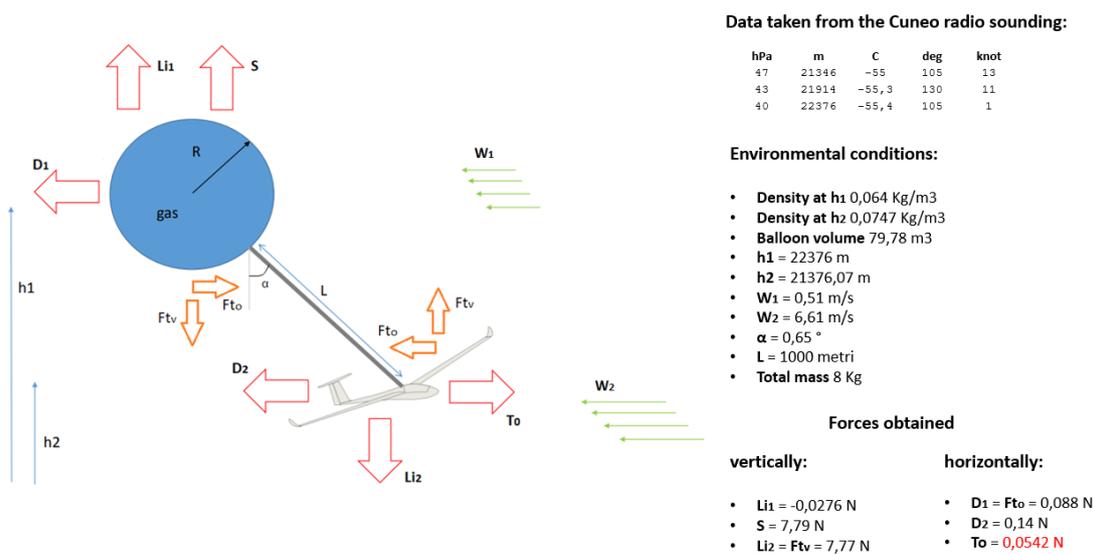


Figura 3.17: Vista frontale di un caso favorevole

La positività di tale situazione è data dalla presenza di un vento di bassa intensità (0,51 m/s) alla quota di 22376 metri. Posizionando il pallone a questa altitudine e imponendo una lunghezza della corda di 1000 metri, si individuerebbe il drone ad una quota di 21376,07 metri, alla quale incide un vento di 6,61 m/s.

Con questa combinazione di parametri ci si ritroverebbe in un caso decisamente favorevole, poiché la resistenza del pallone con l'aria è praticamente nulla e inferiore a quella del drone.

Un altro fattore vantaggioso lo si può evidenziare da questo secondo schema, più preciso rispetto al primo, in cui si nota che le direzioni dei venti che incidono sul pallone e sul drone sono praticamente opposte, così come le due resistenze che si generano. Questo comporta che l'intera piattaforma riesca a rimanere in posizione stazionaria quasi grazie alle sole forze aerodinamiche agenti.

A dimostrazione di ciò, la spinta orizzontale richiesta per bilanciare il tutto è di appena $0,0542 \text{ N}$ e la potenza elettrica necessaria è altrettanto bassa, pari a circa $0,5 \text{ W}$.

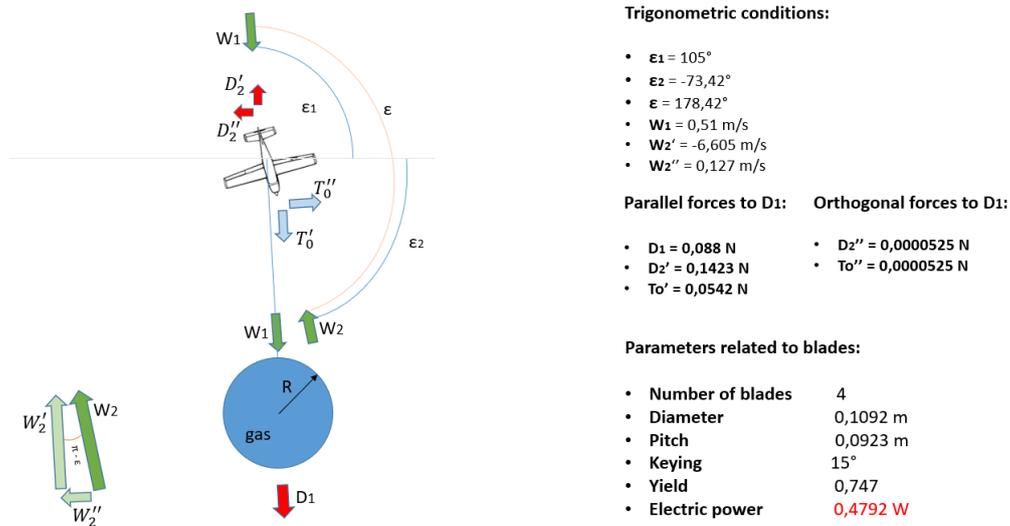


Figura 3.18: Vista dall'alto di un caso favorevole

Schema di riferimento delle forze in gioco in un caso sfavorevole: 12/02/2020

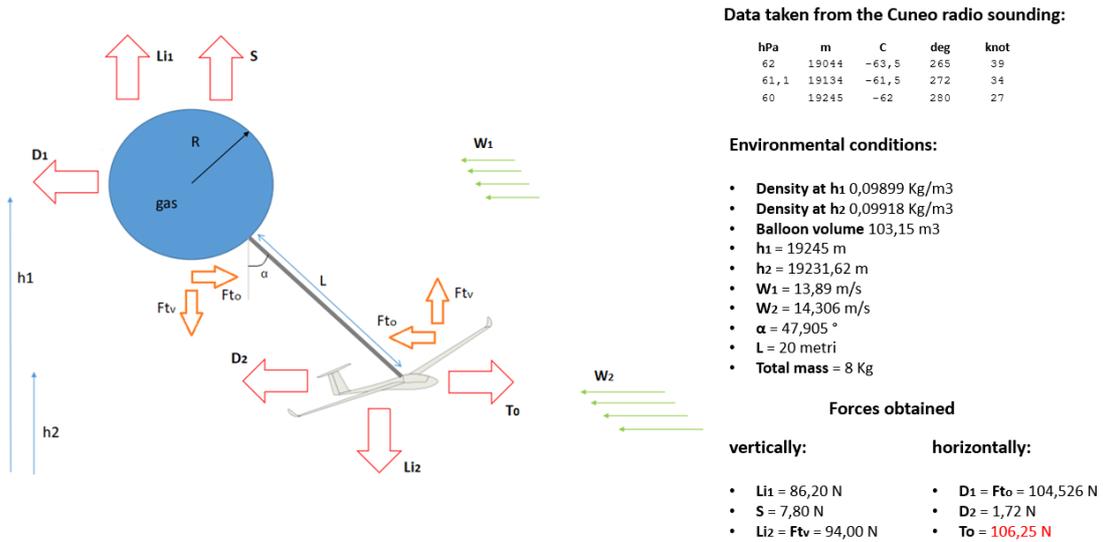


Figura 3.19: Vista frontale di un caso sfavorevole

La negatività di tale situazione è data da una condizione per cui il vento di più bassa intensità è pari a ben 13,89 m/s, alla quota di 19245 metri. Dovendo obbligatoriamente posizionare il pallone a questa altitudine e imponendo una lunghezza della corda di 20 metri, si individuerebbe il drone ad una quota di 21231,62 metri, alla quale incide un vento di 14,306 m/s.

Con questa combinazione di parametri ci si ritroverebbe in un caso decisamente sfavorevole, poiché la resistenza del pallone con l'aria è decisamente alta.

Un altro fattore svantaggioso lo si può evidenziare da questo secondo schema, più preciso rispetto al primo, in cui si nota che le direzioni dei venti che incidono sul pallone e sul drone sono praticamente nello stesso verso, così come le due resistenze che si generano. Questo comporta che l'intera piattaforma riesca a rimanere in posizione stazionaria grazie ad una notevole generazione di spinta orizzontale da parte dei motori.

A dimostrazione di ciò, la spinta orizzontale richiesta per bilanciare il tutto è di ben 106,25 N e la potenza elettrica necessaria è altrettanto alta, pari a circa 3 kW.

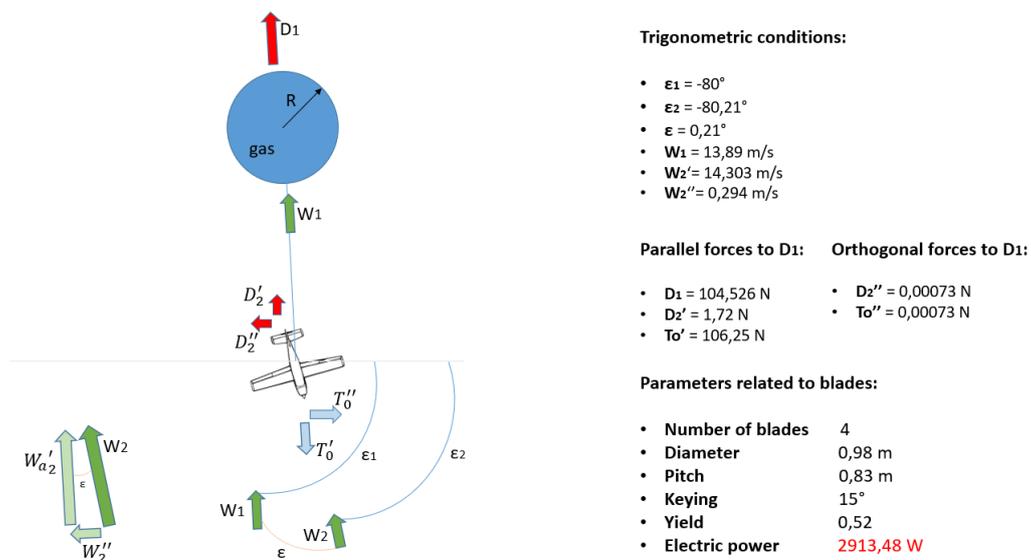


Figura 3.20: Vista dall'alto di un caso sfavorevole

Capitolo 4

Power budget

Dopo aver esaminato il tema dell'aerodinamica relativo al sistema pallone-drone e ottenuto importanti risultati sul dispendio energetico legato al solo sistema propulsivo, si approfondisce ora un argomento altrettanto rilevante, ovvero quello della generazione di energia elettrica a bordo e della conseguente durata di una missione standard della piattaforma.

In particolare, verranno presentate diverse soluzioni:

- *L'impiego di pannelli fotovoltaici da posizionare sul drone, la cui forma verrà ottimizzata da un punto di vista più energetico che aerodinamico.*
- *Un primo studio sul possibile impiego di antenne RECTenna sul ventre del drone o sul lato inferiore del pallone per lo sfruttamento della tecnologia "Harvesting Wireless Power".*
- *Un accenno sull'opportunità di sfruttare il pallone stesso per la generazione di energia elettrica, attraverso studi sui concentratori solari.*

4.1 Strumentazione di bordo

Oltre ai motori, la piattaforma è dotata di una complessa strumentazione di bordo, atta ad acquisire ed inviare a Terra immagini in tempo reale. Quest'ultima sarà trasportata dal pallone stesso e dovrà essere composta da alcuni elementi essenziali:

- *On Board Computer per il controllo delle altre componenti elettroniche.*
- *Sensori, quali GNSS e Alt-IMU, per conoscere costantemente la posizione e l'orientamento della piattaforma durante la missione.*
- *Modem per la gestione del flusso di dati, come immagini riprese e telemetrie.*
- *Servo-controller per la gestione degli attuatori, dei motori e delle camere.*
- *DC/DC converter per l'abbassamento del voltaggio dalla batteria verso gli on board computer.*
- *Una serie di camere, di cui una a NIR (Near-InfraRed), per l'acquisizione delle immagini.*

Ognuno di questi elementi ha un proprio voltaggio ed un periodo di funzionamento diverso che li porta ad avere dei consumi, in termini di Watt, differenti tra di loro.

Nell'immagine seguente si riporta un nuovo elenco degli elementi facenti parte della strumentazione di bordo, con a fianco i consumi massimi, medi e minimi previsti (testati direttamente in laboratorio):

Strumentazione di bordo												
Componenti	Consumi			Unità	Tempo di utilizzo	Consumi per unità			Volo/Voltaggio	Potenze singole		
	max	average	min			max	average	min		max	average	min
On Board Computer	300,00	250,00	200,00 mA	2	Continuativo	600,00	500,00	400,00 mA	5,00 V	1,50	1,25	1,00 W
Modem primario	300,00	150,00	0,00 mA	1	Ogni 10s per 5s	300,00	150,00	0,00 mA	14,80 V	4,44	2,22	0,00 W
GPS sensor	25,00	25,00	25,00 mA	1	Continuativo	25,00	25,00	25,00 mA	5,00 V	0,13	0,13	0,13 W
IMU sensor	4,30	3,10	1,90 mA	1	Continuativo	4,30	3,10	1,90 mA	3,30 V	0,01	0,01	0,01 W
Modem secondario	100,00	50,00	0,00 mA	1	Ogni 10min per 30s	100,00	50,00	0,00 mA	5,00 V	0,50	0,25	0,00 W
DC/DC converter	0,22	0,22	0,22 mA	1	Continuativo	0,22	0,22	0,22 mA	5,00 V	0,00	0,00	0,00 W
Relé 12v	1,00	0,50	0,00 mA	1	Ogni giorno per 10s	1,00	0,50	0,00 mA	12,00 V	0,01	0,01	0,00 W
360° Servo	50,00	50,00	50,00 mA	1	Continuativo	50,00	50,00	50,00 mA	6,00 V	0,30	0,30	0,30 W
Camera	10,00	10,00	10,00 mA	2	Continuativo	20,00	20,00	20,00 mA	5,00 V	0,05	0,05	0,05 W
Camera Infrarossi	10,00	10,00	10,00 mA	1	Continuativo	10,00	10,00	10,00 mA	5,00 V	0,05	0,05	0,05 W
Totale	800,52	548,82	297,12 mA			1110,52	808,82	507,12 mA		6,99	4,26	1,53 W

Figura 4.1: Consumi della strumentazione di bordo

I consumi medi sono stati ottenuti integrando il valore massimo di consumo nel tempo di utilizzo.

Successivamente, si sono ricavate, dalle simulazioni svolte, le relative potenze elettriche necessarie dei motori, durante tutto l'anno:

Tabella 4.1: Potenza richiesta dai motori

max	average	min	
103,43 W	9,79 W	0,47 W	(summer)
374,17 W	56,05 W	0,59 W	(spring)
1329,47 W	232,71 W	0,49 W	(autumn)
11331,26 W	1679,87 W	1,01 W	(winter)

Poiché le differenze, in termini di Watt, tra una stagione e l'altra sono notevoli, si è deciso di alternare il tipo di motore impiegato, durante le missioni, tra due tipologie:

- Due motori da 1Kg massimo di spinta e da 11,1 Volt per le stagioni Primavera-Estate.
- Due motori da 5Kg massimo di spinta e da 22,2 Volt per le stagioni Autunno-Inverno.

In futuro, questa tipologia di suddivisione potrebbe essere ancora amplificata, imponendo di scegliere il motore più adatto per la missione giorno per giorno.

Conoscendo il voltaggio dei motori e le potenze necessarie, si possono ricavare i consumi, in termini di mA, dei relativi motori:

Tabella 4.2: Consumi dei motori

max		average		min		
9,32E+03	mA	8,82E+02	mA	42,01	mA	(summer)
3,37E+04	mA	5,05E+03	mA	53,06	mA	(spring)
5,99E+04	mA	1,05E+04	mA	22,23	mA	(autumn)
5,10E+05	mA	7,57E+04	mA	45,30	mA	(winter)

Ipotizzando di adottare a bordo un'unica batteria da 91,76 Wh e 14,8 V, includendo un margine di sicurezza del 20% per evitare di esaurire la batteria fino al proprio limite e causarne così lo scoppio, si può ricavare la durata della missione che la batteria sarebbe in grado di sostenere, a fronte di tutti i consumi evidenziati:

Tabella 4.3: Potenza richiesta dall'intera piattaforma

max		average		min		
110,42	W	14,06	W	2,00	W	(summer)
381,16	W	60,32	W	2,12	W	(spring)
1336,47	W	236,98	W	2,03	W	(autumn)
11338,25	W	1684,14	W	2,54	W	(winter)

Tabella 4.4: Durata della missione

max		average		min		
0,69	h	5,44	h	38,26	h	(summer)
0,20	h	1,27	h	36,05	h	(spring)
0,06	h	0,32	h	37,75	h	(autumn)
0,01	h	0,05	h	30,13	h	(winter)

Dall'ultima tabella mostrata, si possono fare alcuni commenti:

- *Durante la stagione estiva si hanno le migliori condizioni in termini di potenze elettriche necessarie da parte dei motori e, di conseguenza, anche le durate delle missioni sono più lunghe.*
- *Al contrario, la stagione invernale è quella più ostica, in quanto prevede un impiego di potenze elettriche più alto, con conseguente impossibilità di dotare la piattaforma di una singola batteria.*

Un'idea di impiego di tali piattaforme prevede di lanciare un primo pallone e mantenerlo in volo per una durata di almeno 6 ore, al termine delle quali verrà lanciato un secondo pallone che sostituisca il primo e prolunghi così il servizio fornito.

In tal modo, per mantenere un servizio continuativo sopra una singola zona e per un'intera giornata, sarà sufficiente lanciare quattro palloni a distanza di 6 ore l'uno dall'altro.

4.2 Variazione dell'irraggiamento solare

Prima di stabilire la quantità di pannelli solari necessari alla piattaforma studiata, sarà doveroso tener conto della variabilità dell'irraggiamento solare durante l'intero anno.

A tal scopo, si descriveranno nel paragrafo seguente i parametri che ne influenzano il valore [35]:

- **Latitudine (ϕ) e Longitudine (λ)**, ovvero le coordinate del punto di osservazione, in questo caso è stato preso come riferimento Cuneo ($44,3983^\circ$ e $7,5456^\circ$).
- **Inclinazione del pannello (β)**, ovvero l'angolo che il pannello forma con l'orizzonte, nel nostro caso si ipotizzerà di porre tutti i pannelli sul dorso del drone e, di conseguenza, avere un'inclinazione pari a 0° .
- **Declinazione solare (δ)**, ovvero l'angolo che la direzione dei raggi solari forma a mezzogiorno col piano equatoriale, sul meridiano considerato. In particolare, il Sole raggiunge il valore massimo di declinazione positiva nel mese di Giugno, in occasione del solstizio di estate boreale, mentre raggiunge il massimo valore di declinazione negativa nel mese di Dicembre, in occasione del solstizio di inverno boreale. I giorni del solstizio sono quelli in cui si ha il massimo o il minimo di ore di luce. La declinazione solare δ può essere calcolata per mezzo della formula approssimata di Cooper:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left(360 \cdot \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right) \quad (4.1)$$

con n che rappresenta l'ennesimo giorno dell'anno, a partire dal primo di Gennaio.

Di seguito si riporta l'andamento della declinazione solare nel corso dell'anno:

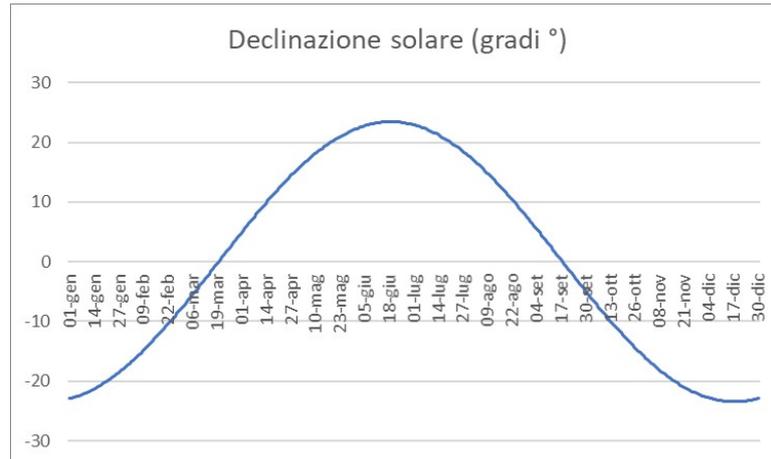


Figura 4.2: Variazione della declinazione solare

Conoscendo questi primi tre angoli, possiamo calcolare l'angolo orario relativo all'alba (h_a) e al tramonto (h_t):

$$h_a = -h_t = \arccos(-\tan(-\phi) \cdot \sin(\delta)) \quad (4.2)$$

- **Eccentricità dell'orbita (e)**, ovvero il moto ellittico della Terra intorno al Sole che, durante il suo periodo di rivoluzione, causa la variazione dell'irraggiamento extraterrestre, dal suo valore medio $I_{cs} = 1367$ $[W/m^2]$, nel corso dell'anno:

$$e = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot n}{365}\right) \quad (4.3)$$

Attraverso cui calcoliamo la variazione dell'irraggiamento extraterrestre I_o :

$$I_o = I_{cs} \cdot e \quad (4.4)$$

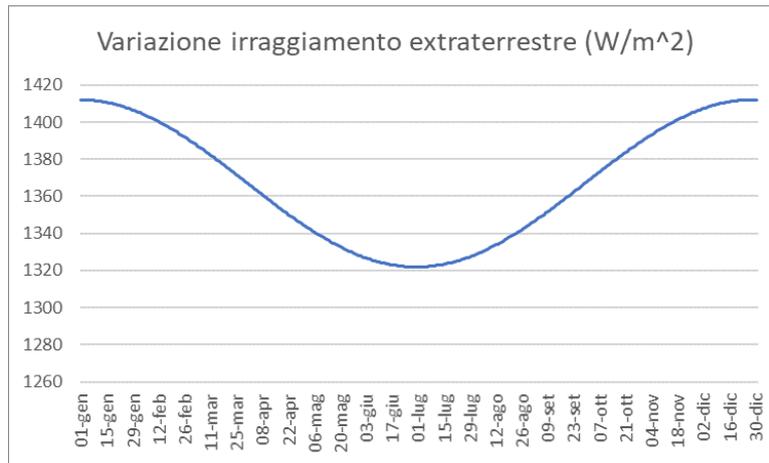


Figura 4.3: Variazione dell'irraggiamento extraterrestre

Dal grafico si evince come la vicinanza della Terra al Sole sia maggiore durante l'Inverno, con un alto irraggiamento extraterrestre $I_o > 1400$ $[W/m^2]$, mentre avviene esattamente il contrario d'Estate.

- **Angolo orario (ω)**, ovvero la distanza angolare tra il Sole e la sua posizione a mezzogiorno. Tale angolo è positivo nelle ore antimeridiane e risulta pari al numero di ore di distanza dal mezzogiorno, moltiplicato per 15 (poiché la Terra ruota di 15 gradi all'ora alla velocità nominale di 360 gradi al giorno):

$$\omega = 15 \cdot h_{sol} - 180^\circ \quad (4.5)$$

in cui h_{sol} rappresenta l'ora solare.

Quest'ultima può essere ottenuta conoscendo l'ora convenzionale e la longitudine del punto di osservazione [60]:

$$h_{sol} = h_{conv} + \frac{E - 4 \cdot (\lambda_{mr} - \lambda)}{60} \quad (4.6)$$

Nella precedente equazione h_{conv} è l'ora data dall'orologio, λ_{mr} è la longitudine del meridiano di riferimento (Greenwich), λ è la longitudine del punto di osservazione.

E rappresenta una correzione, variabile nel corso dell'anno, chiamata equazione del tempo. Il valore di E fluttua poiché la velocità della Terra attorno al Sole non è costante durante l'anno.

Il valore della correzione può essere ricavato dalla seguente relazione:

$$E = -10,1 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{3 \cdot n + 31}{366}\right) - 6,9 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{n}{366}\right) \quad (4.7)$$



Figura 4.4: Equazione del tempo

- **Altezza solare o Elevazione (α) e Azimut (γ)**, ovvero la posizione del Sole rispetto ad un punto.

Il primo è l'angolo verticale che la direzione collimata al Sole forma con il piano orizzontale; il secondo è l'angolo orizzontale tra il piano verticale passante per il Sole e la direzione del sud, ed è positivo verso est e negativo verso ovest.

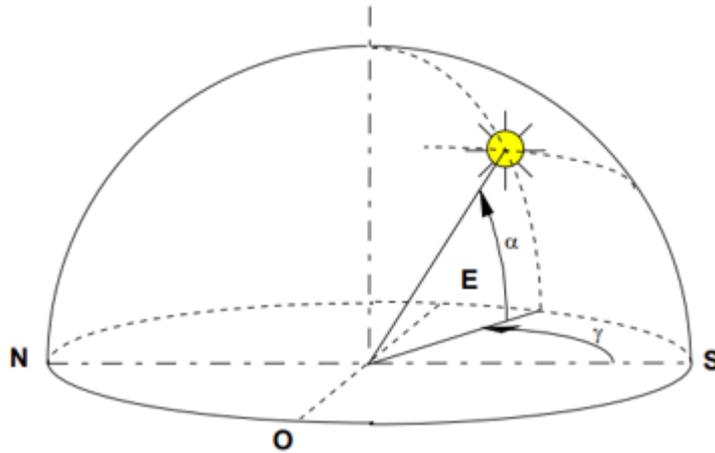


Figura 4.5: Posizione del Sole rispetto ad un punto

Questi due angoli dipendono a loro volta dalla declinazione (δ), dalla latitudine (ϕ) e dall'angolo orario (ω).

La posizione del Sole in ogni istante dell'anno può essere quindi ottenuta dalle seguenti relazioni:

$$\alpha = \arcsin(\sin(\delta) \cdot \sin(\phi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega)) \quad (4.8)$$

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(\alpha)}\right) \quad (4.9)$$

Esse consentono di calcolare la posizione del sole conoscendo la latitudine (che caratterizza spazialmente il punto di osservazione), la declinazione (che dipende dal giorno e dal mese in cui si effettua l'osservazione) e l'angolo orario (che dipende dall'ora in cui si effettua l'osservazione).

Nelle immagini successive vengono mostrate le variazioni che questi angoli comportano durante i due solstizi e i due equinozi:

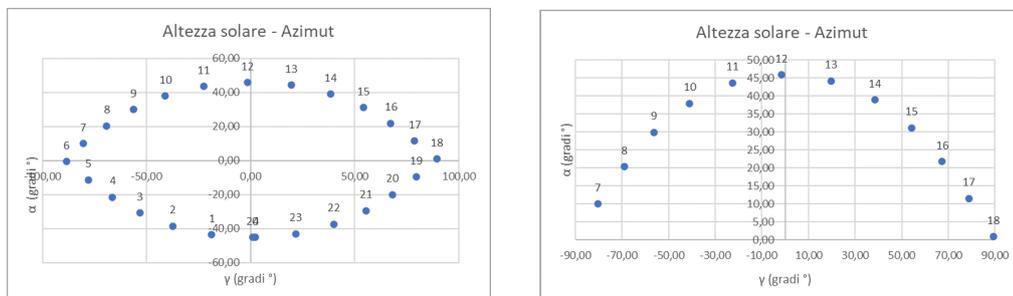


Figura 4.6: Posizione del Sole durante l'equinozio di primavera.

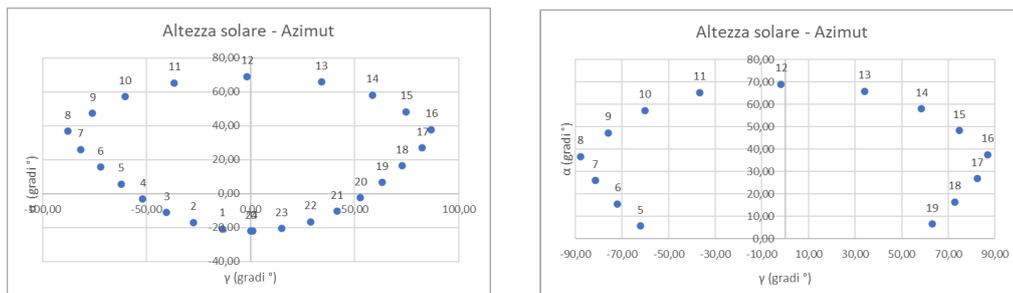


Figura 4.7: Posizione del Sole durante il solstizio d'estate.

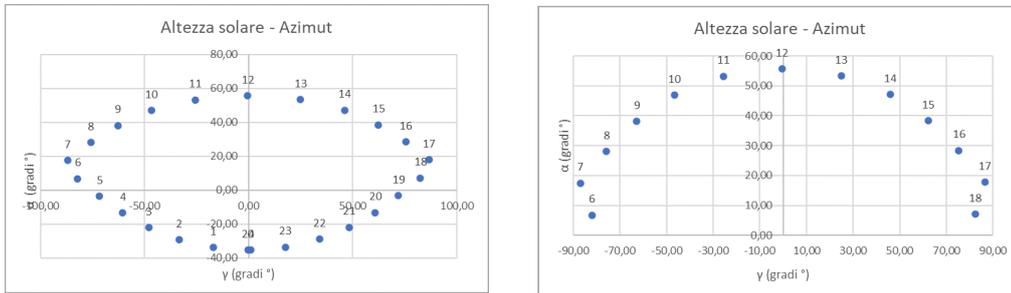


Figura 4.8: Posizione del Sole durante l'equinozio d'autunno.

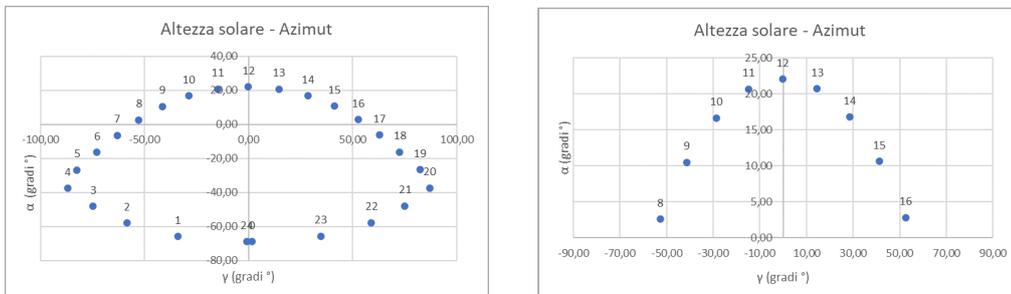


Figura 4.9: Posizione del Sole durante il solstizio d'inverno.

Per calcolare quando il Sole si troverà in una posizione minima adeguata affinché i raggi solari possano raggiungere i pannelli solari, si imporrà che l'altezza solare debba essere maggiore dell'angolo orario relativo all'alba ($\alpha > h_a$).

L'energia incidente dipende, oltre che dalla costante solare, dall'angolo che i raggi formano con la superficie dei moduli. Tale angolo di inclinazione solare, che indicheremo con θ , è possibile calcolarlo analiticamente mediante considerazioni di trigonometria sferica, dati la latitudine del sito, la declinazione solare (δ), l'angolo orario (ω), l'azimut (γ) e l'inclinazione dei pannelli (β) [58]:

$$\begin{aligned}
\cos(\theta) &= \cos(\phi) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\delta) \\
&+ \sin(\phi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\gamma) \\
&+ \sin(\gamma) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\omega) \cdot \cos(\delta) \\
&+ \sin(\phi) \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\delta) \\
&- \cos(\phi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \sin(\delta)
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Infine, verrà posta un'ultima correzione, quella relativa alla quota alla quale il pannello è posizionato.

In particolare, si terrà conto del rapporto tra la lunghezza del percorso effettivo della luce solare attraverso l'atmosfera terrestre e la lunghezza del percorso minimo, che si verifica nel caso di radiazioni perpendicolare alla superficie terrestre. Indicando con m_z la massa d'aria relativa ad un'altitudine z sopra il livello del mare, si avrà che:

$$m_z = m_0 \cdot \frac{p_z}{p_0} \tag{4.11}$$

dove p_z è la pressione atmosferica alla quota z e p_0 è la pressione atmosferica al livello del mare, mentre m_0 è la massa di aria relativa al livello del mare e può essere calcolata conoscendo l'angolo di altezza solare:

$$m_0 = \frac{1}{\sin(\alpha)} \tag{4.12}$$

che da errori inferiori all'1% per $\alpha \geq 15^\circ$.

Quando il Sole è in posizione perfettamente verticale rispetto al piano dell'orizzonte di una determinata località, la luce solare compie il percorso più breve possibile attraverso l'atmosfera; se invece il Sole si trova ad un'angolazione più bassa il percorso diventa più lungo, il che provoca un maggiore assorbimento e dispersione della radiazione solare e, di conseguenza, una minore densità della radiazione stessa sul pannello stesso.

Ora è possibile calcolare il coefficiente di trasmissione della radiazione diretta (τ_b):

$$\tau_b = 0.5 \cdot (\exp(-0.65 \cdot m_z) + \exp(-0.095 \cdot m_z)) \quad (4.13)$$

Infine, ricaviamo la radiazione diretta incidente:

$$I = I_o \cdot \tau_b \cdot \cos(\theta) \quad (4.14)$$

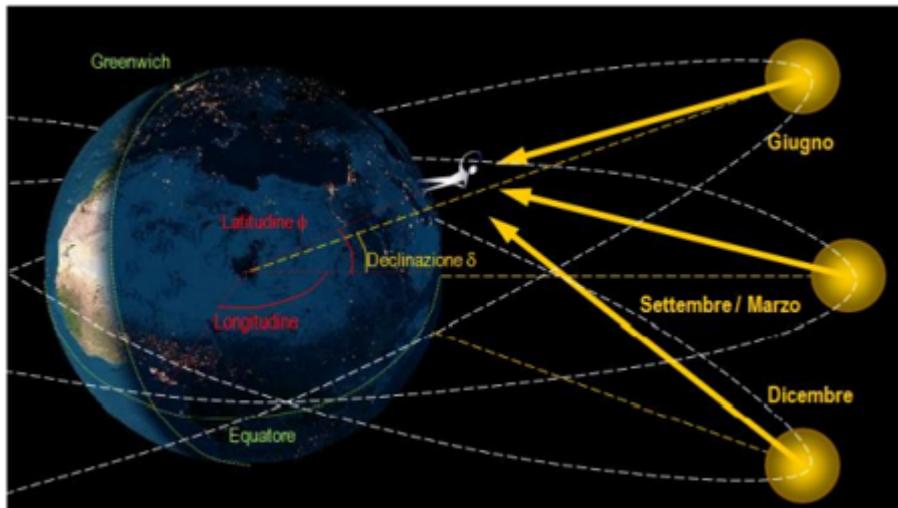


Figura 4.10: Immagine di riferimento sulle variazioni del Sole

Sottolineando che per questa trattazione si è presa in considerazione solo la radiazione incidente diretta, di seguito, viene mostrata una tabella con i risultati sull'irraggiamento solare medio (W/m^2) e il numero di ore di luce solare ottenuti, tenendo conto di tutte le variabili sopra elencate, per ogni stagione dell'anno:

Tabella 4.5: Risultati trattazione sulla variazione dell'irraggiamento solare

Solar radiation			Day Night			
702,16	W/m2	(summer)	13,54	h	10,46	h (summer)
718,84	W/m2	(spring)	13,74	h	10,26	h (spring)
418,29	W/m2	(autumn)	9,62	h	14,38	h (autumn)
468,46	W/m2	(winter)	9,74	h	14,26	h (winter)

Capacità delle batterie

Se volessimo prolungare la missione di una singola piattaforma e mantenerla in volo per tutta la notte, sarebbe possibile ricavare il valore della capacità delle batterie utili durante la notte, in base ai dati raccolti sulle potenze necessarie per la strumentazione di bordo e per i motori e conoscendo le ore di durata della notte, relative alle diverse stagioni [33]:

$$Capacity = 1,2 \cdot h_{notte} \cdot P_{tot} \quad (4.15)$$

Dove 1,2 rappresenta un margine di sicurezza del 20 %.

Tabella 4.6: Batteria necessaria per completare un'intera missione notturna

max		average		min		
1386,34	Wh	176,46	Wh	25,09	Wh	(summer)
4692,00	Wh	742,47	Wh	26,11	Wh	(spring)
23058,49	Wh	4088,64	Wh	34,95	Wh	(autumn)
193998,71	Wh	28815,76	Wh	43,42	Wh	(winter)

4.3 Pannelli Fotovoltaici

Dopo aver trovato il valore della potenza totale (strumentazione di bordo più motori) da dover generare, si cerca di progettare il sistema di pannelli fotovoltaici, in grado di generare tale energia.

Per i pannelli solari, le condizioni di prova standard (STC) sono 1 atm di pressione atmosferica, temperatura della cella di 25 °C e un irraggiamento solare di circa 1000 W/m².

Tuttavia, nella stratosfera, è improbabile che queste condizioni si ottengano, principalmente a causa della differente situazione ambientale, del ridotto processo di convezione ad alte quote e delle variazioni dei valori di irraggiamento solare rispetto al luogo di installazione dei pannelli.

Pertanto, tali variazioni verranno parzialmente prese in considerazione nel dimensionamento dei pannelli solari, utilizzando alcune formulazioni valide per sistemi fotovoltaici a terra [38], ma comunque accettabili per una prima approssimazione in ambiente stratosferico:

- *Inizialmente, si calcola la temperatura media a cui è sottoposta la cella:*

$$T_{cell} = T_{amb} + I \cdot \frac{(NOCT - 20)}{0,8} \quad (4.16)$$

Dove, T_{amb} è la temperatura ambiente del luogo di installazione del pannello, I è l'irraggiamento solare (diverso per ogni stagione) e $NOCT$ è la temperatura operativa nominale della cella, la quale ha un valore tipico di 45 °C.

Trovandoci costantemente nella stratosfera, è possibile stabilire di avere per tutto l'anno approssimativamente una temperatura ambiente che si aggiri intorno ai -60 °C e, di conseguenza, una temperatura della cella che oscilli tra i -35 °C e i -45 °C.

- Dopo aver ottenuto tale valore, è possibile calcolare il coefficiente di scambio termico (n) che rappresenta l'efficienza delle conversioni dovute alla temperatura e alle ore di luce solare che si otterranno dall'irraggiamento solare giornaliero:

$$n = 1 - (\gamma_{vmp} \cdot (T_{cell} - T_{stc})) \quad (4.17)$$

Dove, γ_{vmp} è il coefficiente di temperatura delle celle, il quale ha un valore tipico dello 0,5 %/°C per i pannelli in silicio cristallino che sono generalmente più efficienti con un T_{stc} pari a 25 °C.

Il coefficiente di scambio termico (n) indica quanta efficacia perda il pannello all'aumentare della temperatura ambiente, in particolare variando linearmente con essa. Nella stratosfera la temperatura ambiente è molto bassa e, quindi, si ha un coefficiente di scambio termico vantaggioso e superiore all'unità ($\approx 1,3$).

Di conseguenza, si ha un aumento dell'efficienza del pannello.

- Infine, per mantenersi conservativi, si suppone un'efficienza dell'intero sistema del solo 75 %, da cui si ottiene:

$$P_{sun} = 1,25 \cdot \frac{E_{req}}{(n \cdot H_{sun})} \quad (4.18)$$

Dove:

- P_{sun} è la dimensione totale dei pannelli richiesti (a STC).
- E_{req} rappresenta l'energia richiesta (ottenuta dalla moltiplicazione dei kW necessari per il numero di ore di utilizzo previsto).
- H_{sun} rappresenta le ore di luce, precedentemente suddivise in base alla stagione.

Attraverso la metodologia appena spiegata, si ricavano i valori della potenza solare necessaria per ognuna delle stagioni e per tre differenti combinazioni:

Tabella 4.7: Potenza solare richiesta per 24 ore

max		average		min		
186,04	W	23,68	W	3,37	W	(summer)
632,65	W	100,11	W	3,52	W	(spring)
3167,98	W	561,73	W	4,80	W	(autumn)
26547,12	W	3943,20	W	5,94	W	(winter)

Tabella 4.8: Potenza solare richiesta per le ore diurne

max		average		min		
104,94	W	13,36	W	1,90	W	(summer)
362,24	W	57,32	W	2,02	W	(spring)
1270,13	W	225,21	W	1,93	W	(autumn)
10775,45	W	1600,54	W	2,41	W	(winter)

Tabella 4.9: Potenza solare richiesta per le ore notturne

max		average		min		
81,10	W	10,32	W	1,47	W	(summer)
270,41	W	42,79	W	1,50	W	(spring)
1897,86	W	336,52	W	2,88	W	(autumn)
15771,67	W	2342,66	W	3,53	W	(winter)

Alcuni commenti sulle tabelle appena illustrate:

- *La prima tabella fa riferimento all'intero periodo giornaliero (24 h), immaginando che i pannelli solari siano in grado di generare sufficiente energia per tutto il sistema (strumentazione di bordo e motori) durante il giorno e contemporaneamente immagazzinarne dell'altra per ricaricare le batterie da utilizzare di notte.*
- *La seconda tabella fa riferimento al solo periodo di pieno giorno, in cui i pannelli solari generano energia durante le ore di luce.*
- *La terza tabella fa riferimento al solo periodo della notte, in cui i pannelli solari hanno precedentemente caricato le batterie da impiegare.*

Una volta conosciuta la potenza totale da generarsi, è possibile calcolare la superficie dei pannelli solari, attraverso la seguente formula:

$$S = \frac{P_{sun}}{I \cdot \eta} \quad (4.19)$$

Dove I è l'irraggiamento solare che incide mediamente sulla Terra durante un giorno solare, mentre η rappresenta il rendimento del pannello che, per i solar-tape presi in considerazione [56], risulta oscillare tra il 2 % e il 24 %.

Introducendo tale valore nella formula precedente (4.19), si possono ricavare alcuni risultati relativi alle superfici dei pannelli solari:

Pannelli solari con rendimento del 2%

Tabella 4.10: Superficie pannelli solari per le 24 ore

max		average		min		
13,25	m2	1,69	m2	0,24	m2	(summer)
44,00	m2	6,96	m2	0,24	m2	(spring)
378,68	m2	67,15	m2	0,57	m2	(autumn)
2833,48	m2	420,87	m2	0,63	m2	(winter)

Tabella 4.11: Superficie pannelli solari per le sole ore diurne

max		average		min		
7,47	m2	0,95	m2	0,14	m2	(summer)
25,20	m2	3,99	m2	0,14	m2	(spring)
151,82	m2	26,92	m2	0,23	m2	(autumn)
1150,10	m2	170,83	m2	0,26	m2	(winter)

Tabella 4.12: Superficie pannelli solari per le sole ore notturne

max		average		min		
5,78	m2	0,74	m2	0,10	m2	(summer)
18,81	m2	2,98	m2	0,10	m2	(spring)
226,86	m2	40,23	m2	0,34	m2	(autumn)
1683,37	m2	250,04	m2	0,38	m2	(winter)

Pannelli solari con rendimento del 24%

Tabella 4.13: Superficie pannelli solari per le 24 ore

max		average		min		
1,10	m2	0,14	m2	0,02	m2	(summer)
3,67	m2	0,58	m2	0,02	m2	(spring)
31,56	m2	5,60	m2	0,05	m2	(autumn)
236,12	m2	35,07	m2	0,05	m2	(winter)

Tabella 4.14: Superficie pannelli solari per le sole ore diurne

max		average		min		
0,62	m2	0,08	m2	0,01	m2	(summer)
2,10	m2	0,33	m2	0,01	m2	(spring)
12,65	m2	2,24	m2	0,02	m2	(autumn)
95,84	m2	14,24	m2	0,02	m2	(winter)

Tabella 4.15: Superficie pannelli solari per le sole ore notturne

max		average		min		
0,48	m2	0,06	m2	0,01	m2	(summer)
1,57	m2	0,25	m2	0,01	m2	(spring)
18,91	m2	3,35	m2	0,03	m2	(autumn)
140,28	m2	20,84	m2	0,03	m2	(winter)

Dalle simulazioni svolte, si evince che la superficie alare del drone si aggiri intorno ai 5 m². Dalle tabelle illustrate, si nota come questa dimensione sia, nella maggior parte dei casi, più che sufficiente per ospitare tutta la metratura necessaria dei pannelli fotovoltaici.

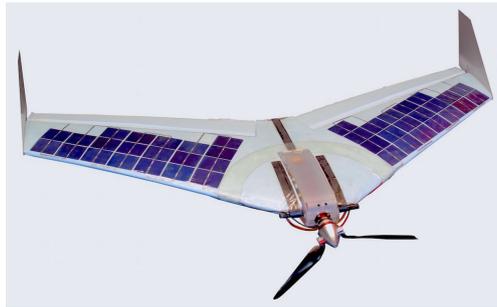


Figura 4.11: Esempio di impiego dei pannelli fotovoltaici su un UAV

Nei casi in cui si richieda una superficie maggiore, si possono adottare alcune soluzioni che sfruttano un diverso impiego dei pannelli solari:

- *L'ottimizzazione della forma del drone non dal punto di vista aerodinamico, ma dal punto di vista energetico, ovvero adottando una forma più tozza che consenta di posizionare i pannelli solari orizzontali anche sul dorso e sul muso del drone.*
- *L'impiego di pannelli solari anche verticali da posizionare lungo la fusoliera e sulla coda del drone.*
- *Il posizionamento di pannelli solari sul ventre del drone per la cattura di radiazioni riflesse o provenienti da puntatori posti a terra.*

Poiché l'impiego di pannelli fotovoltaici in ambiente stratosferico presenta alcune difficoltà, quali degrado dovuto alle temperature troppo estreme ed eccessiva esposizione ai raggi ultravioletti del Sole, la soluzione del puntatore posto a terra verrà ulteriormente approfondita nel capitolo successivo.

4.4 Trasmissione di potenza wireless

Poiché l'obiettivo è quello di porre un'antenna ricevente (A_r) sul ventre del drone o sul lato inferiore del pallone, imporre una dimensione di quest'ultima pari a 5 m^2 .

Inoltre, si vorrebbe optare per l'impiego di un'antenna a terra che proietti un fascio di energia divergente verso il pallone. Di conseguenza, la dimensione dell'antenna trasmittente sarà sicuramente minore di A_r , pari a circa 1 m^2 .

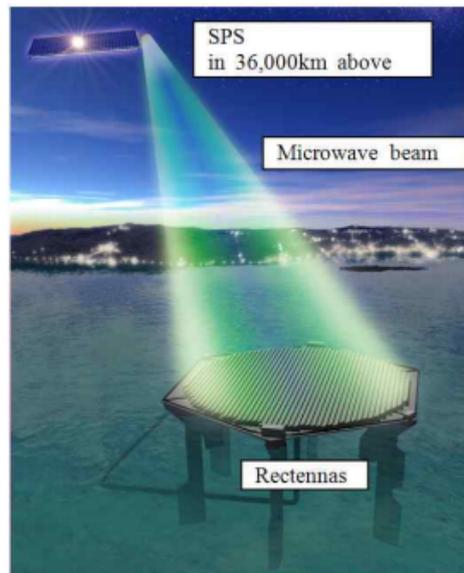


Figura 4.12: Esempio di impiego di un antenna Rectenna

Con queste imposizioni, si può facilmente verificare di essere in una regione di campo lontano, attraverso la cosiddetta "condizione di Fraunhofer" [59]:

$$r > \frac{2 \cdot D_r^2}{\lambda} \quad (4.20)$$

Dove:

- $\lambda =$ Lunghezza d'onda, pari a 0,12 metri.
- $D_r =$ Diametro dell'antenna ricevente.
- $r =$ La distanza tra le antenne, pari a circa 20000 metri.

Non necessariamente le antenne saranno allineate tra loro, ma l'antenna ricevente sarà comunque posta all'interno del fascio divergente trasmesso e, quindi, la loro distanza sarà approssimabilmente pari all'altitudine del pallone o del drone.

Si conferma l'ipotesi della regione di campo lontano, ovvero in cui la distanza (r) tra la sorgente e l'antenna ricevente è superiore alle dimensioni dell'antenna trasmittente (4.20) [57].

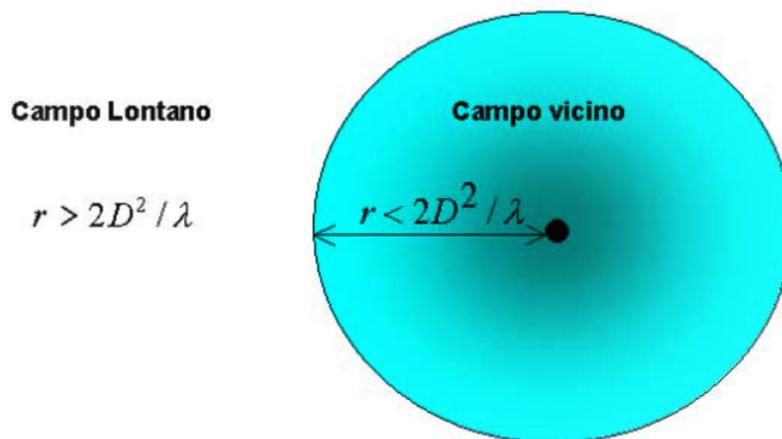


Figura 4.13: Caratterizzazione del campo in relazione alla distanza dalla sorgente

Per la stima della trasmissione di potenza in campo lontano, si parte generalmente dall'equazione di Friis per il calcolo del Beam efficiency (η) [17]:

$$\eta = \frac{P_r}{P_t} = \frac{A_t \cdot A_r}{\lambda \cdot r} \quad (4.21)$$

Dove:

- P_t = Potenza trasmessa dall'antenna [W].
- P_r = Potenza necessaria da ricevere dall'antenna [W].
- A_t = Area dell'antenna trasmittente [m²].
- A_r = Area dell'antenna ricevente [m²].

Con le imposizioni precedentemente menzionate, il Beam efficiency (η) sarà pari allo 0,2 %, valore che non sorprende, soprattutto per la presenza dell'attenuazione atmosferica che porta ad una conseguente dispersione dell'energia durante la trasmissione a lunga distanza, da cui si ottiene:

Tabella 4.16: Potenza da trasmettere

max		average		min		
5,41E+04	W	6,88E+03	W	9,79E+02	W	(summer)
1,87E+05	W	2,95E+04	W	1,04E+03	W	(spring)
6,55E+05	W	1,16E+05	W	9,92E+02	W	(autumn)
5,55E+06	W	8,25E+05	W	1,24E+03	W	(winter)

L'impiego di piccole antenne trasmettenti leggere e facilmente trasportabili favorirà l'abbassamento dei costi e della complessità del sistema. Inoltre, non si presenteranno problemi relativi al Power density (P_d) nella regione ricevente:

$$P_d = \frac{A_t \cdot P_t}{\lambda^2 \cdot r^2} \quad (4.22)$$

Quest'ultimo rappresenta una criticità per le trasmissioni di potenza wireless radiative a lunga distanza, il cui limite, secondo gli standard dell'ente ANSI/IEEE, non deve essere superato per non rischiare di danneggiare le persone.

L'idea finale del progetto sarà quella di posizionare diverse antenne trasmettenti, in più punti di una certa zona, per fare in modo che ognuna di esse riesca a fornire fasci di energia a numerose piattaforme stratosferiche contemporaneamente.

4.5 Future soluzioni per l'accumulo di energia

Una possibile, futura ed ulteriore soluzione potrebbe essere quella di sfruttare il pallone stesso per la produzione di energia elettrica a bordo, attraverso due possibili configurazioni:

- L'utilizzo del pallone come concentratore di raggi solari su un ricevitore piccolo, posto al suo interno [39].

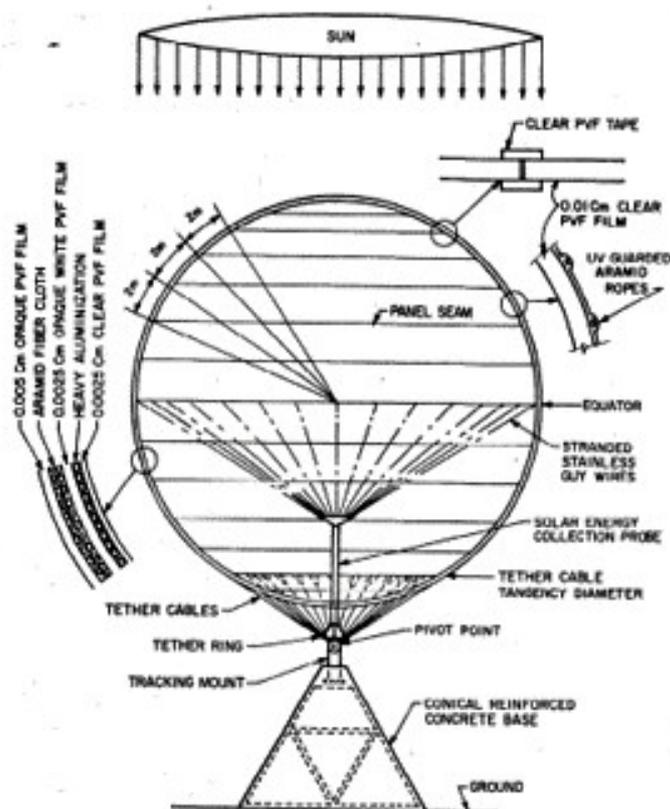


Figura 4.14: Pallone convergente per la generazione di energia

Questo sistema prevederebbe di impiegare per il pallone un tessuto particolare, composto da:

- Un emisfero superiore, rivolto quindi verso il Sole, formato da uno strato di polivinilfluoruro [PVF] trasparente di 0,01 cm di spessore, rinforzato da fibra aramidica resistente ai raggi ultravioletti.*
- Un emisfero inferiore, formato da uno strato di polivinilfluoruro [PVF] bianco opaco di 0,0025 cm di spessore per catturare la luce.*

Con questo sistema si potrebbero posizionare una serie di lunghe strisce di celle fotovoltaiche, all'interno del pallone, rivolte o verso lo strato trasparente per catturare la radiazione diretta o verso lo strato opaco per catturare la radiazione riflessa.

- *L'utilizzo di pannelli solari posizionati attorno alla superficie sferica del pallone stesso [28].*

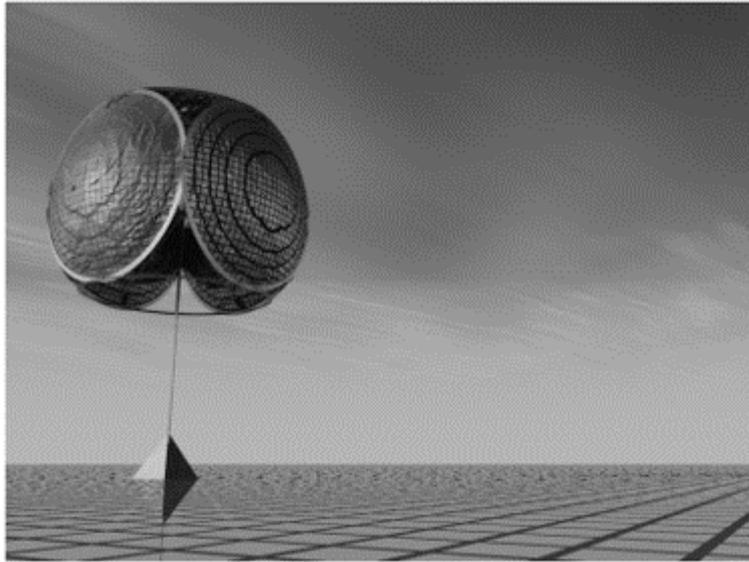


Figura 4.15: *Pallone con pannelli solari sulla superficie*

Idealmente, supponendo che solo l'emisfero superiore sia esposto alla luce solare, attraverso questo sistema si potrebbe generare una potenza (P_{pallone}) notevole, poiché proporzionale alla superficie ($S = 4 \cdot \pi \cdot r^2$) del pallone:

$$P_{\text{pallone}} = I \cdot \eta \cdot \frac{S}{2} \quad (4.23)$$

Dove I e η rappresentano ancora una volta l'irraggiamento solare e il rendimento dei pannelli solari.

Dal simulatore realizzato, emerge che la superficie sferica del pallone, ad alte quote, tende mediamente a superare i 100 m², assumendo anche di avere un rendimento medio e attendibile dei pannelli del 15 %, si potrebbe ipotizzare che questa metodologia possa garantire una generazione di energia elettrica superiore ai 3 kW per tutto il periodo dell'anno.

Per queste due configurazioni presentate, si presta meglio un pallone riempito esclusivamente ad elio, poiché quest'ultimo è dotato di:

- Basso punto di ebollizione.*
- Bassa solubilità.*
- Alta conducibilità termica.*
- Basso indice di rifrazione.*

Nonostante questa accortezza, si potrebbero verificare comunque alcune problematiche relative al sicuro impiego di due sistemi altamente fragili, quali i pannelli solari e il pallone, combinati tra di loro.

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

L'obiettivo di questa Tesi è stato quello di implementare un modello matematico che possa permettere di simulare, giorno per giorno, l'ambiente all'interno del quale la piattaforma è costretta ad operare.

Si è dimostrato come le condizioni atmosferiche possano essere determinanti per la missione, i venti in quota e la scarsa densità sono parametri che, per una piattaforma stratosferica che punta al mantenimento di una posizione fissa e stabile, possono diventare critici.

Uno sviluppo, senz'altro necessario per quest'applicazione, sarà la realizzazione di un simulatore ancora più avanzato che, partendo da quello già illustrato, simuli in tempo reale l'ambiente operativo della piattaforma a diverse quote e dia risultati sulle possibili forze in gioco, al fine di suggerire preventivamente le migliori condizioni in cui posizionare la piattaforma.

Per quanto riguarda l'aspetto della generazione di energia elettrica a bordo, si è studiato come le soluzioni per soddisfare le richieste energetiche esistano e siano, eventualmente, sommabili tra di loro.

Uno sviluppo futuro sarà quello di impiegare contemporaneamente più di un sistema, generando una parte dell'energia dai pannelli fotovoltaici e l'altra parte dal trasferimento di potenza wireless.

Il fine ultimo di questo studio è stato quello di evidenziare le diverse problematiche presenti in questo campo e provare a fornire alcune soluzioni. Sarà in futuro necessario trovare un buon compromesso tra le varie configurazioni elencate, evitando di aggiungere troppe batterie o pannelli solari che, in questo modo, appesantiscano eccessivamente la struttura e di dover introdurre, di conseguenza, maggiore gas nel pallone per poter sollevare il tutto.

L'aggiunta di altro gas causerebbe un aumento del volume del pallone che incrementerebbe, a sua volta, la resistenza con l'aria, richiedendo maggiore spinta da parte del sistema propulsivo per compensarla e, quindi, maggiore potenza elettrica da generare a bordo.

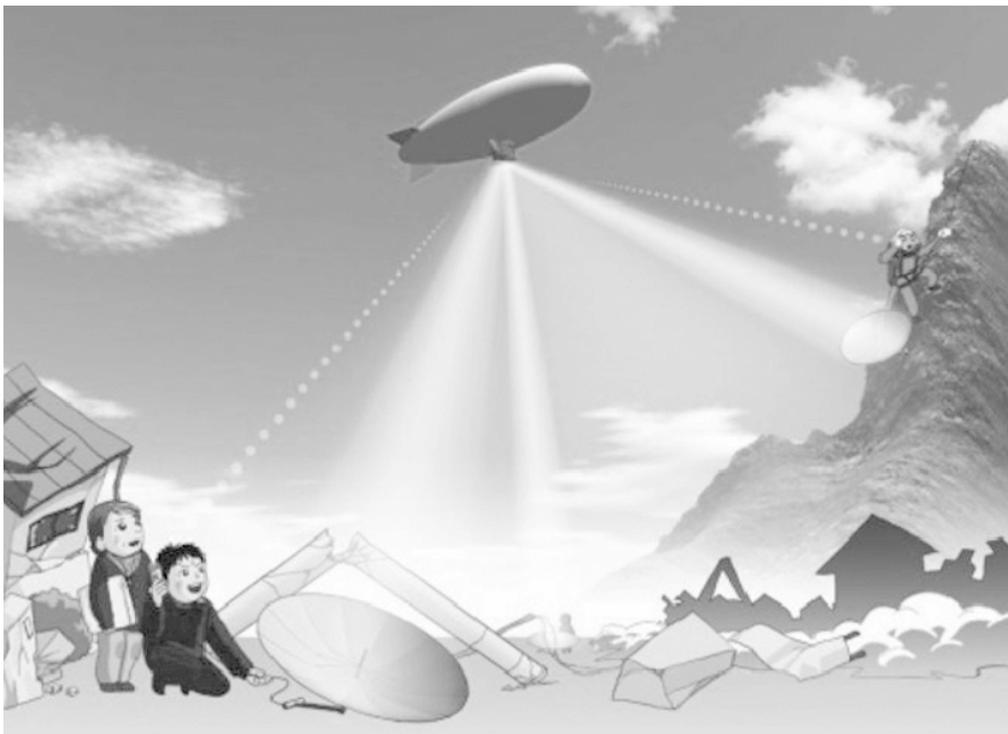


Figura 5.1: *Una futura azione di salvataggio*

Bibliografia

- [1] Gai, M., et al. "A scientific mission based on a high altitude stratospheric balloon." *International Journal of Aerospace Sciences* 3.1 (2014): 18-29.

- [2] Wu, Yao, et al. "Altitude control performance of a natural energy driven stratospheric aerostat." *Advances in Space Research* 56.11 (2015) 2508-2514.

- [3] Doyle Jr, George R., and Jerome J. Vorachek. "Investigation of Stability Characteristics of Tethered Balloon Systems." (1971).

- [4] Gemignani, Matteo, and Salvo Marcuccio. "Dynamic Characterization of a High-Altitude Balloon during a Flight Campaign for the Detection of ISM Radio Background in the Stratosphere." *Aerospace* 8.1 (2021): 21.

- [5] Akita, Daisuke. "Feasibility study of a sea-anchored stratospheric balloon for long-duration flights." *Advances in space research* 50.4 (2012): 508-515.

- [6] Fesen, Robert, and Yorke Brown. "A method for establishing a long duration, stratospheric platform for astronomical research." *Experimental Astronomy* 39.3 (2015): 475-493.

- [7] TANI, ANGELO. "DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA PROPULSIVO ELETTRICO PURO DI UN VELIVOLO CESSNA 172K."

- [8] Ramesh, Sai Sudha, et al. "Numerical evaluation of station-keeping strategies for stratospheric balloons." *Aerospace Science and Technology* 80 (2018): 288-300.
- [9] Gonzalo, Jesús, et al. "On the capabilities and limitations of high altitude pseudo-satellites." *Progress in Aerospace Sciences* 98 (2018): 37-56.
- [10] Gemignani, M. A. T. T. E. O. "Characterization of low cost high-altitude balloons as a near-space testing platform." Aerospace Division, Dept. of Civil and Industrial Engineering, University of Pisa, Italy. Accessed: Jul 17 (2019).
- [11] Jiang, Yi, et al. "Performance evaluation for scientific balloon station-keeping strategies considering energy management strategy." *Renewable Energy* 156 (2020): 290-302.
- [12] MENNA, LUCA. "Progetto preliminare di eliche libere e intubate per velivoli ultraleggeri." (2014).
- [13] Renato Tognaccini. "Lezioni di aerodinamica dell'ala rotante. Eliche, rotor ed aeromotori". Università degli Studi di Napoli Federico II, 2010.
- [14] Brandt, John, and Michael Selig. "Propeller performance data at low reynolds numbers." 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2011.
- [15] Qu, Zhengyu, et al. "Project of high altitude balloon launched micro glider: Aircraft design, control and flight test." *International Journal of Micro Air Vehicles* 12 (2020): 1756829320979955.
- [16] Du, Huafei, et al. "Station-keeping performance analysis for high altitude balloon with altitude control system." *Aerospace Science and Technology* 92 (2019): 644-652.

- [17] van Wynsberghe, Erinn, and Ayse Turak. "Station-keeping of a high-altitude balloon with electric propulsion and wireless power transmission: A concept study." *Acta Astronautica* 128 (2016): 616-627.
- [18] Lunghini, Alessandro. "Studio di fattibilità di un velivolo in grado di sostituire le funzioni di un satellite geostazionario."
- [19] Zhang, Donghui, et al. "Tandem, long-duration, ultra-high-altitude tethered balloon and its system characteristics." *Advances in Space Research* 66.10 (2020): 2446-2465.
- [20] Cosentino, O., et al. "Transmediterranean flights, in the edge of two centuries." *Advances in Space Research* 33.10 (2004): 1594-1599.
- [21] Redell, Frederick, et al. "Inflatable-rigidizable solar concentrators for space power applications." 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 2005.
- [22] Valenta, Christopher R., and Gregory D. Durgin. "Harvesting wireless power: Survey of energy-harvester conversion efficiency in far-field, wireless power transfer systems." *IEEE Microwave Magazine* 15.4 (2014): 108-120.
- [23] Harouni, Zied, et al. "A dual circularly polarized 2.45-GHz rectenna for wireless power transmission." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 10 (2011): 306-309.
- [24] Li, Jun, et al. "An approach for estimating perpetual endurance of the stratospheric solar-powered platform." *Aerospace Science and Technology* 79 (2018): 118-130.
- [25] Cipolla, Dott Ing Vittorio, Alessandro A. Quarta, and Luca Lepori. "Analisi preliminare di un UAV solare atto al pattugliamento marittimo continuativo."

- [26] Shinohara, Naoki. "Beam efficiency of wireless power transmission via radio waves from short range to long range." *Journal of electromagnetic engineering and science* 10.4 (2010): 224-230.
- [27] Han, Sang-Min, et al. "Compact wake-up module design based on an energy-harvesting rectenna for wireless sensor receivers." *International Journal of Antennas and Propagation* 2015 (2015).
- [28] Gurfil, Pini, and Joseph Cory. "Electric power generation on mars using photovoltaic helium balloons." *Mars* (2009): 83-97.
- [29] Grena, Roberto. "Energy from solar balloons." *Solar energy* 84.4 (2010): 650-665.
- [30] Al-Sharqi, Mutasem. "Far-field (radiative) Charging Electronic Devices Techniques Based on Wireless Power Transfer Technology." (2017).
- [31] Li, Jun, Mingyun Lv, and Kangwen Sun. "Optimum area of solar array for stratospheric solar-powered airship." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 231.14 (2017): 2654-2665.
- [32] Ghosh, Kuntal, Anirban Guha, and Siddhartha P. Dutttagupta. "Power generation on a solar photovoltaic array integrated with lighter-than-air platform at low altitudes." *Energy Conversion and Management* 154 (2017): 286-298.
- [33] Noth, A., et al. "SKY-SAILOR Design of an autonomous solar powered martian airplane." *Proceedings of the 8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA 2004) ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, November 2-4, 2004. European Space Research and Technology Centre (ESTEC), 2004.*
- [34] CANTISANI, PASQUALE. "Studi preliminari al progetto strutturale di un velivolo UAV biplano ad energia solare per missioni HALE (high

- altitude long endurance)." (2009).
- [35] Campinoti, Matteo, Luigi Martorano, and Dott Ing Marco Antonelli. "Studio applicativo sullo sfruttamento dell'energia solare con dimensionamento di un impianto innovativo a collettori parabolici composti." (2011).
- [36] ROSSI, PAOLO. "Studio di fattibilita di un sistema di conversione dell'energia solare per un velivolo a propulsione elettrica." (2008).
- [37] Du, Huafei, et al. "Thermal performance analysis and comparison of stratospheric airships with rotatable and fixed photovoltaic array." *Energy Conversion and Management* 158 (2018): 373-386.
- [38] Ariyo, F., et al. "Web-based application for the sizing of a photovoltaic (pv) solar power system." *American J. Eng. Res.(AJER)* 5 (2016): 219-222.
- [39] Hall, F. F. "Weightless Solar Energy Collection,." First Brazilian Energy Congress. 1978.
- [40] Gowda, Vinay R., et al. "Wireless power transfer in the radiative near field." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 15 (2016): 1865-1868.

Sitografia

- [41] https://en.wikipedia.org/wiki/File:Nasa_wind_vs_alt_curves.JPG

- [42] <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Easy%20Access%20Rules%20for%20Standardised%20European%20Rules%20of%20the%20Air%20%28SERA%29.pdf>

- [43] <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

- [44] http://www.xlta.org/library/noaa/Scientific_Ballooning_Handbook_Part1.pdf

- [45] http://www.xlta.org/library/noaa/Scientific_Ballooning_Handbook_Part2.pdf

- [46] <http://astra-planner.soton.ac.uk/>

- [47] https://github.com/sobester/astra_simulator

- [48] <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>

- [49] <https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/dati-in-tempo-reale/Dati-in-tempo-reale.html>

- [50] <https://www.scielo.br/j/jatm/a/JQv95PgKcDTrn95vLLV8qN/?lang=en>
- [51] <https://www.thalesgroup.com/en/taxonomy/term/7436>
- [52] <https://www.airpressonline.it/38506/piattaforme-stratosferiche-aeronautica/>
- [53] <https://sinovoltaics.com/technology/top8-leading-companies-developing-solar-powered-drone-uav-technology/>
- [54] http://www.aeronautica.difesa.it/comunicazione/editoria/rivaeronautica/archivio/RA_2019_04/Pagine/Articolo_3.aspx
- [55] <https://www.focus.it/scienza/energia/palloni-fotovoltaici-nel-cielo>
- [56] <https://infinitypv.com/products/opv>
- [57] http://www.greensite.it/effetti_campi_elettromagnetici.htm
- [58] https://amslaurea.unibo.it/3506/1/Donati_Fabio_Tesi.pdf
- [59] <http://www.tibaldi.eu/listing/mydocs/antenne.pdf>
- [60] http://download.acca.it/BibLus-net/VecchiAllegatiBiblus/Approfondimenti_Tecnici/Impianti_Solari_Teoria_64.pdf
- [61] <https://loon.com/technology/flight-systems/>
- [62] <https://www.pintoelettronica.com/>