

---

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

---

SCUOLA DI INGEGNERIA  
Sede di Forlì

Corso di Laurea in  
INGEGNERIA AEROSPAZIALE  
Classe L-9

TESI DI LAUREA  
In Meccanica Del Volo

Studio e applicazione di sottosistemi avionici per  
velivoli a pilotaggio remoto

CANDIDATO

Riccardo Corelli

RELATORE

Prof. Fabrizio Giulietti

Anno Accademico 2022/2023



# Indice

<b>1) Introduzione</b> .....	1
<b>1.1: Definizione di Drone Multirotores</b> .....	1
<b>1.2: Struttura tipica di un Multirotores</b> .....	1
<b>2) Storia dei multirotores e regolamentazione vigente</b> .....	4
<b>2.1: Storia dei multirotores</b> .....	4
<b>2.2: Regolamentazione</b> .....	5
<b>3) Applicazioni industriali per droni: Volo indoor</b> .....	7
<b>3.1: Volo indoor e applicazioni industriali</b> .....	7
<b>3.2: Tecnologie sviluppate per il volo indoor senza GPS</b> .....	7
<b>3.3: Multirotores adattati per uso lavorativo</b> .....	8
<b>3.4: Droni progettati per uso indoor industriale</b> .....	13
<b>4) Sensoristica per volo indoor e mappatura di interni</b> .....	18
<b>4.1: Principali sensori per sistemi anticollisione e misurazioni industriali</b> .....	18
<b>5) Implementazione e impieghi futuri</b> .....	23
<b>5.1: Dagli inizi ad oggi</b> .....	23
<b>5.2: Impieghi futuri</b> .....	24
<b>6) Conclusioni</b> .....	27
<b>6.2: Solo di passaggio</b> ... ..	27
<b>Bibliografia</b> .....	i

## Indice delle figure

Figura 1: Multirottore DJI Phantom 2.....	1
Figura 2: Telaio di un multirottore .....	2
Figura 3: DJI Phantom 4 PRO.....	8
Figura 4: Scheda tecnica DJI Phantom 4 PRO.....	9
Figura 5: Scheda Tecnica DJI Mini 3 PRO.....	10
Figura 6: DJI Mavic 2 Enterprise Advanced.....	11
Figura 7: Scheda Tecnica Mavic 2 Enterprise Advanced .....	12
Figura 8: Stereo 2 Batteria .....	13
Figura 9: Scheda Tecnica Stereo 2.....	14
Figura 10: Scheda tecnica Elios 2 .....	15
Figura 11: Grafico Autonomia Elios 3.....	16
Figura 12: Scheda Tecnica Elios 3 .....	17
Figura 13: Sensore ad Ultrasuoni [19] .....	18
Figura 14: Zenmuse H20N, Caratteristiche Termocamere e Telemetro .....	19
Figura 15: ICESat della NASA .....	20
Figura 16: LiDAR Doppler .....	21
Figura 17: LiDAR su Volvo EX90 e LiDAR in Campo Agricolo .....	21
Figura 18: Zenmuse L1 Scheda Tecnica.....	22
Figura 19: Emesent HOVERMAP ST-X .....	25

# 1) Introduzione

## 1.1: Definizione di Drone Multirottore

I droni, detti anche APR ovvero aeromobili a pilotaggio remoto, sono dispositivi in grado di sostenersi in volo, sfruttando gli stessi principi che vengono utilizzati negli aerei e negli elicotteri ma, a differenza di questi, sono di dimensioni molto ridotte e non necessitano di un operatore a bordo per poter funzionare.

In questo elaborato, si tratterà principalmente di quei dispositivi così chiamati “Multirotori”, così definiti in quanto la propulsione, unica fonte di sostentamento, viene fornita da più motori elettrici ad elica montanti su di essi.

Il numero di motori, varia in base agli impieghi per il quale il multirottore è designato, ma tipicamente si va da un minimo di 3 ad un massimo di 8.



Figura 1: Multirottore DJI Phantom 2

## 1.2: Struttura tipica di un Multirottore

Un multirottore è caratterizzato da una serie di componenti e sistemi, alcuni presenti indipendentemente dall'utilizzo designato per il drone, altri equipaggiabili per specifici compiti operativi. Le componenti principali sono:

- **Telaio:** è la struttura portante del drone, permette l'installazione di tutte le componenti elettroniche fondamentali per il controllo del dispositivo, dei motori e della batteria. Esso deve essere sufficientemente robusto, da resistere ad eventuali urti e a tutte le sollecitazioni dovute a forze aerodinamiche e inerziali che agiscono sulla struttura durante le operazioni di volo. È composto da una base centrale da cui si diramano i

bracci, sui quali vengono alloggiati motori ed eliche. I dispositivi ad uso industriale sono costituiti, nella maggior parte dei casi, da materiali compositi per sostenere il peso delle attrezzature montate su di esso, mentre quelli pensati per uso amatoriale sono solitamente prodotti in plastica o alluminio.



Figura 2: Telaio di un multirotore

- **Batteria:** è il componente che permette al multirotore di avere tutta l'energia necessaria per funzionare: in base alla sua capacità, definisce l'autonomia di volo del multirotore, ma allo stesso tempo costituisce una buona parte del peso del velivolo. La batteria deve essere posizionata il più vicino possibile al baricentro del drone per ridurre al minimo l'inerzia durante le manovre di volo e garantirne la stabilità. Le principali tipologie utilizzate sono quelle ai polimeri di litio dette LiPo, le quali riescono a garantire grandi quantità di energia in volumi ridotti e sono completamente modellabili secondo le necessità costruttive.
- **Motori:** sono i componenti che trasformano l'energia elettrica ricevuta dalla batteria in energia meccanica. Sono posizionati all'estremità dei bracci del telaio e insieme alle eliche forniscono la spinta propulsiva necessaria per il sostentamento e le operazioni di volo, semplicemente variando la velocità di rotazione. Tipicamente vengono usati i motori elettrici brushless per la loro semplicità costruttiva e il peso ridotto, nonché per la mancanza di spazzole dovuta all'assenza di contatti elettrici sull'albero del rotore. I motori vengono controllati da dispositivi elettronici (ESC), che hanno il compito di regolare il voltaggio di corrente in ingresso ad essi in base alla richiesta dell'utilizzatore.

- **Eliche:** sono profili aerodinamici che, insieme ai motori, forniscono la spinta necessaria al sostentamento e funzionamento del velivolo. Sono tipicamente a doppia pala e a passo fisso. Il loro peso e la loro dimensione sono caratteristiche fondamentali per l'accoppiamento con il giusto motore. Infatti, un peso eccessivo porterebbe a velocità di rotazione non sufficienti, mentre un peso ridotto ad un fuorigiri del motore elettrico.
- **Dispositivo di controllo:** è il componente che potrebbe essere definito il “cervello del drone”. Esso è responsabile di elaborare gli input ricevuti dall'operatore e, effettuando una serie di correzioni in base ai dati che riceve in input dai sensori interni, fornire in uscita il comportamento richiesto dal pilota. Esso si occupa anche di gestire eventuali disturbi esterni come il vento in modo da semplificare il lavoro all'operatore. All'interno di questo dispositivo sono presenti solitamente un GPS, un altimetro e un IMU (inertial measurement unit), il quale misura le accelerazioni e le velocità angolari a cui il multiroto è sottoposto.
- **Ricevitore:** è il modulo che permette la trasmissione dei dati tra il drone e il relativo radiocomando e funziona solitamente grazie ad una antenna.

Le componenti principali di un drone sono queste, ma ne esistono altre secondarie equipaggiabili in base alle necessità. Esse sono molteplici e verranno approfondite nei capitoli successivi dell'elaborato, con particolare attenzione per quelle relative al compimento di operazioni di volo indoor.

## 2) Storia dei multirotori e regolamentazione vigente

### 2.1: Storia dei multirotori

La nascita dei multirotori si può erroneamente collocare in epoche recenti, ma in realtà questi dispositivi risalgono all'inizio del ventesimo secolo, di pari passo con la nascita dei primi velivoli ad ala fissa. Il primo mezzo funzionante risale al 1907 [1], anno nel quale i fratelli Breguet costruirono un Giroplano che, riuscì ad alzarsi in volo e a compiere una serie di operazioni ad una quota di circa 60 centimetri dal suolo. Agli inizi degli anni '50, la ricerca si concentrò nel trovare un'alternativa ai convenzionali elicotteri, in modo da rendere più efficiente l'utilizzo della potenza fornita dal motore senza doverla direzionare parzialmente al rotore di coda. Nel 1956 infatti, venne costruito il primo velivolo detto Convertawings [2], dotato di quattro rotori e due motori che ne controllavano la velocità di rotazione e di conseguenza la manovrabilità stessa del mezzo. Questo rappresentò un punto di svolta, in quanto dimostrò la possibilità di utilizzare velivoli multirotori per volare.

Sempre all'inizio del secolo scorso, per ragioni militari dovute a cause belliche, nacque il bisogno di poter pilotare i velivoli a distanza, i così detti aeromobili a pilotaggio remoto (APR). Nel 1918 Elmer Sperry [3] effettuò il primo volo con un velivolo radiocomandato, segnando così la nascita della prima categoria di droni, designati come bersagli mobili per l'esercitazione dei piloti. Successivamente, furono utilizzati come ordigni bellici e, con l'incombere della Guerra Fredda, come dispositivi di spionaggio e ricognizione. Questa tendenza permane tuttora in quanto circa il 90% dei dispositivi APR viene utilizzato per scopi militari.

Con il passare del tempo e il progressivo sviluppo della tecnologia, questi dispositivi pur mantenendo il loro scopo prevalentemente militare, si sono sviluppati in moltissimi altri ambiti fino a raggiungere lo status di multirottore attuale.

Come già detto, l'avanzamento della tecnologia ha portato ad una miniaturizzazione sempre maggiore dei componenti interni di un drone, all'abbassamento dei costi di assemblaggio e all'avvicinamento di questi dispositivi al pubblico, fino ad arrivare ad un utilizzo industriale ed amatoriale.



## 2.2: Regolamentazione

L'utilizzo di questi dispositivi in modo non regolamentato ha portato inevitabilmente a verificarsi di incidenti, costringendo le autorità competenti alla stipulazione di normative specifiche e imponendo l'acquisizione di competenze che devono essere riconosciute tramite il conseguimento di un patentino apposito. Ciò vale sia per poter compiere operazioni lavorative che per semplici voli amatoriali con droni.

Nel 2006 è stata approvata la prima licenza commerciale per l'utilizzo di multirotori radiocomandati, ma non sono comunque mancate le difficoltà nello stabilire delle regole apposite per l'utilizzo di questi dispositivi. Infatti, solo nel 2022 è stato promulgato il documento "EAR for UAS" (Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems) [4], che definisce esattamente la terminologia da utilizzare in questo ambito. In particolare, distinguiamo gli UA (Unmanned Aircraft), ovvero "ogni aeromobile che opera o è progettato per operare autonomamente o essere pilotato a distanza, senza pilota a bordo", da UAS (Unmanned Aircraft System), cioè "un aeromobile senza equipaggio e i suoi dispositivi di controllo remoto"

Tra i punti principali di questa normativa:

- l'obbligo di ottenere un certificato UE per poter utilizzare i droni. I certificati variano in base alla tipologia di drone che si vuole utilizzare, ma come parametro più importante è definito il peso;
- la necessità di registrarsi come piloti e assegnare un numero di operatore al proprio drone;
- l'altezza massima di volo deve essere di 120 metri;
- il drone può volare solo di giorno;
- il divieto di effettuare voli in zone interdette;
- il divieto di volare sopra persone non coinvolte.

Queste sono solo alcune delle normative stabilite dall'EASA (European Union Aviation Safety Agency) [5], la quale gestisce le normative tecniche nel settore aeronautico e controlla il mercato unico dell'aviazione europea.

Oggigiorno questi dispositivi sono molto diversificati, sia per scopo che per costruzione e prezzo, andando dai semplicissimi *Ready to Use* (pronti all'uso) ai più complessi e largamente equipaggiabili multirotori per utilizzo industriale. Ad esempio, questi dispositivi hanno preso sempre più piede nel settore cinematografico e televisivo grazie alla possibilità di realizzare inquadrature particolari che non sarebbero possibili tramite

operatore umano con telecamera. Inoltre, grazie alla possibilità di sorvolare certe aree senza alcun pericolo per gli operatori, i droni sono approdati anche nell'ambito delle video ispezioni industriali, della fotogrammetria e della ripresa con telecamere termiche.

### **3) Applicazioni industriali per droni: Volo indoor**

#### **3.1: *Volo indoor e applicazioni industriali***

I droni sono dispositivi molto versatili, utilizzati in modi diversi per semplificare e velocizzare attività che prima dovevano essere svolte manualmente con grande dispendio di tempo e denaro.

Sempre più spesso, infatti, vengono progettati dispositivi che permettono ad un operatore, di compiere lavori senza la necessità di impiegare manodopera, riducendo così costi operazionali ed evitando al personale di sottoporsi a lavori rischiosi. La maggior parte dei droni multirottore, nascono con una telecamera integrata, in modo da poter essere governabili anche in assenza di visione diretta del velivolo da parte dell'operatore. Questo aspetto fornisce al personale la possibilità di esplorare aree non facilmente accessibili o addirittura pericolose. Negli ultimi anni, ha preso sempre più piede la pratica di affidare le video ispezioni industriali a società che svolgono questi servizi attraverso l'utilizzo di droni, portando anche le marche produttrici più affermate a concentrarsi sulla fornitura di apparecchiature adatte a questo tipo di operazioni. La pratica del volo indoor rappresenta una valida soluzione per compiere sopralluoghi nei siti industriali, all'interno dei quali si presenta la necessità di fare valutazioni per la sicurezza sul lavoro, senza impiegare direttamente sul campo, personale che potrebbe essere esposto a pericoli. Tra le più avveniristiche non possiamo non citare la DJI [6], il cui slogan è proprio "The future of possible" che rappresenta appieno il desiderio di raggiungere il massimo sviluppo possibile di ciò che si può creare con la tecnologia moderna.

#### **3.2: *Tecnologie sviluppate per il volo indoor senza GPS***

La disciplina del volo indoor industriale vede i droni confrontarsi con problematiche diverse in base al tipo di ambiente da ispezionare. Per questo motivo è necessario che siano equipaggiati con una serie di sensori e strumenti che permettano loro di adattarsi a tutte le possibili situazioni da affrontate per lo svolgimento del compito a loro assegnato. Alcuni ambienti possono presentare caratteristiche di luminosità molto basse, perciò i multirotori devono essere muniti di un sistema di navigazione in grado di "vedere" gli ostacoli al buio, un esempio è l'utilizzo di sensori LiDAR o sensori di prossimità. Quest'ultimi sono solitamente molto costosi e richiedono una grande quantità di corrente

per poter funzionare. Per esempio, la società Flyability ha dotato il drone “Elios 2” di una serie di luci a led in modo da poter sostituire i LiDAR con sensori ottici per il rilevamento della distanza, ove possibile, e aumentarne così l’autonomia senza incrementare la capacità della batteria.

Oltre a sistemi di prevenzione degli urti, alcuni droni vengono anche dotati di sistemi di protezione in caso di impatto. I più comuni sono le protezioni intorno alle eliche, mentre sono meno diffuse le gabbie di protezione a 360°, che smorzano gli urti ed evitano di scaricare la forza dell’impatto sul telaio del drone. I principali compiti che questi droni sono chiamati a eseguire si suddividono in azioni di controllo, monitoraggio o mappatura, le quali richiedono una serie di equipaggiamenti diversi. Per esempio, un drone progettato per effettuare video ispezioni e verificare visivamente l’integrità delle strutture sarà semplicemente equipaggiato di telecamera, mentre, per lavori di monitoraggio e mappatura, potrebbero essere necessari dispositivi LiDAR, termocamere e spessimetri ad ultrasuoni per verificare la condizione interna delle infrastrutture.

### **3.3: *Multirotori adattati per uso lavorativo***

Il primo multirottore che si prende in considerazione è il DJI Phantom 4 PRO [7], progettato appositamente per effettuare riprese aeree di altissima qualità, sfruttato sia da operatori amatoriali, sia a livello industriale. È munito di sensore CMOS 1” che garantisce una qualità video fino a 4K/60fps e foto a 20 MP. L’ampia gamma di funzionalità e dotazioni di questo drone, unito al prezzo molto abbordabile di circa 2,000€, lo rendono una validissima soluzione senza dover puntare ai top di gamma progettati per il lavoro industriale.



Figura 3: *DJI Phantom 4 PRO*

Il drone è fornito di sistemi di smorzamento autonomo dei disturbi esterni come il vento. Inoltre, esso è dotato di sistemi di sicurezza per semplificarne l'utilizzo da parte dell'operatore tra cui un sistema di individuazione degli ostacoli in cinque direzioni esclusa quella superiore. Ciò è permesso dai moltissimi sensori montati sul drone come misuratori di distanza, LiDAR e telecamere che garantiscono una visione quasi a 360° dell'ambiente circostante. Il sistema "FlightAutonomy" creato dalla DJI è incaricato di gestire questo sistema di rilevamento ostacoli e di evitare che il drone impatti con l'ambiente circostante. Le automazioni non sono terminate, in quanto è stata anche sviluppata una "batteria di volo intelligente" [7] la quale è in grado di stimare la propria autonomia di volo residua e inviare un messaggio all'operatore al raggiungimento della distanza minima richiesta per un ritorno sicuro alla base di partenza. Inoltre, se questa batteria viene conservata per molto tempo, si scaricherà automaticamente per salvaguardare le prestazioni. Di seguito vengono riportate le caratteristiche principali del multirobotore.

Aeromobile		Sistema di visione	
Peso (con batteria ed eliche)	1375 g	Sistema di visione	Sistema di visione frontale Sistema di visione verso il basso
Dimensioni diagonali (eliche escluse)	350 mm	Intervallo di velocità	±50 km/h a 2 m dal suolo
Massima velocità di salita	Modalità S: 6 m/s Modalità P: 5 m/s	Intervallo di quota	0 - 10 m (0 - 33 ft)
Massima velocità di discesa	Modalità S: 4 m/s Modalità P: 3 m/s	Intervallo di funzionamento	0 - 10 m (0 - 33 ft)
Velocità massima	Modalità S: 72 km/h Modalità A: 58 km/h Modalità P: 50 km/h	Distanza di rilevamento ostacoli	0,7 - 30 m (2 - 98 ft)
Angolo massimo di inclinazione	Modalità S: 42° Modalità A: 35° Modalità P: 25°	Campo visivo (FOV)	In avanti: 60°(orizzontale), ±27°(verticale) Posteriore: 60°(orizzontale), ±27°(verticale) Verso il basso: 70°(frontale e posteriore), 50°(laterale)
Massima velocità angolare	Modalità S: 250°/s Modalità A: 150°/s	Frequenza di misurazione	In avanti: 10 Hz Posteriore: 10 Hz Verso il basso: 20 Hz
Quota massima di tangenza sopra il livello del mare	19685 piedi (6000 m)	Ambiente operativo	Superfici definite e adeguatamente illuminate (> 15 lux)
Resistenza alla velocità del vento	10 m/s	Sistema a infrarossi	
Autonomia di volo	Circa 30 minuti	Distanza di rilevamento ostacoli	0,2 - 7 m (0,6 - 23 piedi)
Intervallo di temperatura operativa	0 - 40 °C	Campo visivo (FOV)	70° (orizzontale), ±10° (verticale)
Sistemi di posizionamento satellitare	GPS/GLONASS	Frequenza di misurazione	10 Hz
Accuratezza del volo stazionario	Verticale: ±0,1 m (con posizionamento visivo) ±0,5 m (con posizionamento GPS)  Orizzontale: ±0,3 m (con posizionamento visivo) ±1,5 m (con posizionamento GPS)	Ambiente operativo	Superfici con materiali a riflessione diffusa, e riflettenti > 8%
Stabilizzatore		Caricabatterie	
Stabilizzazione	3 assi (beccheggio, rollio, imbardata)	Tensione	17,4 V
Intervallo controllabile	Beccheggio: da -90° a +30°	Potenza nominale	100 W
Massima velocità angolare controllabile	Beccheggio: 90°/s	Batteria di volo intelligente	
Intervallo di vibrazione angolare	±0,02°	Capacità	5070 mAh
		Tensione	15,2 V
		Tipo di batteria	LiPo 4S
		Energia	69,2 Wh
		Peso netto	468 g
		Intervallo di temperatura operativa	5 - 40 °C

Figura 4: Scheda tecnica DJI Phantom 4 PRO

Proseguendo con le soluzioni proposte da DJI è bene approfondire una categoria definita Mini Droni, alcuni dei quali hanno un peso al decollo inferiore ai 250g. Ciò permette a questi dispositivi di essere utilizzati liberamente a scopo amatoriale senza dover acquisire la licenza obbligatoria per poter utilizzare droni con pesi maggiori. Questa serie di velivoli si differenzia in base agli equipaggiamenti e alle caratteristiche tecniche, permettendo ai Mini Droni di essere impiegati in svariati ambiti e ambienti di lavoro.

Tra quelli che non necessitano di licenza per essere impiegati spicca il DJI Mini 3 PRO [8], punta di diamante della serie mini con peso al decollo inferiore a 250g. Esso è equipaggiato con un sensore 1/1.3 pollici in grado di riprendere ogni singolo dettaglio, grazie alla risoluzione in 4K, rimanendo sempre lontano da eventuali ostacoli. Questo è possibile grazie ai vari sensori disposti frontalmente, posteriormente e nella parte inferiore, che garantiscono una sicurezza maggiore rispetto ad altri mezzi meno equipaggiati. Punto forte di questo multirotores è anche l'autonomia oraria, che con circa 34 minuti di volo, vedrebbe molti suoi colleghi finire al tappeto prima di lui. Il prezzo di partenza di questo DJI Mini 3 PRO si aggira attorno agli 839€.

Aeromobile	Fotocamera
<b>Peso al decollo</b>	<b>Sensore</b>
<249 g <sup>[1]</sup>	CMOS 1/1.3" Pixel effettivi: 48 MP
<b>Dimensioni</b>	<b>Obiettivo</b>
Richiuso: 145x90x62 mm Aperto: 171x245x62 mm <sup>2</sup> Aperto (con eliche): 251x362x70 mm	FOV: 82° Formato equivalente: 24 mm Apertura: f/1.7 Distanza di messa a fuoco: 1 m a ∞
<b>Distanza diagonale</b>	<b>Intervallo ISO</b>
247 mm	Video: 100 - 6400 (automatico), 100 - 6400 (manuale) Foto: 100 - 6400 (automatico), 100 - 6400 (manuale)
<b>Massima velocità di salita</b>	<b>Velocità otturatore</b>
5 m/s (Modalità S) 3 m/s (Modalità N) 2 m/s (Modalità C)	Otturatore elettronico: 2-1/8000 s
<b>Massima velocità di discesa</b>	<b>Dimensione massima dell'immagine</b>
5 m/s (Modalità S) 3 m/s (Modalità N) 1.5 m/s (Modalità C)	8064 × 6048
<b>Velocità massima (a livello del mare, in assenza di vento)<sup>[2]</sup></b>	<b>Modalità fotografiche</b>
16 m/s (Modalità S) 10 m/s (Modalità N) 6 m/s (Modalità C)	Scatto singolo Intervallo: JPEG: 2/3/5/7/10/15/20/30/60 s JPEG + RAW: 2/3/5/7/10/15/20/30/60 s
<b>Quota massima di tangenza</b>	<b>Formato foto</b>
Con la Batteria di volo intelligente: 4000 m <sup>[2]</sup>	Formato: Sfera, 180°, Grandangolo e Verticale
<b>Autonomia di volo</b>	<b>Risoluzione video</b>
34 minuti (con la Batteria di volo intelligente e misurata in volo a 21,6 km/h in assenza di vento)	4K: 3840x2160 a 24/25/30/48/50/60 fps 2.7K: 2720x1530 a 24/25/30/48/50/60 fps FHD: 1920x1080 a 24/25/30/48/50/60 fps Slow Motion: 1920x1080 a 120 fps
<b>Autonomia in volo stazionario</b>	<b>Modalità HDR</b>
30 minuti (con la Batteria di volo intelligente, in assenza di vento)	Foto: HDR supportato in modalità Scatto singolo Video: HDR supportato durante la registrazione a 24/25/30 fps
<b>Massima distanza di volo</b>	<b>Formato video</b>
18 km (con la Batteria di volo intelligente e misurata in volo a 43,2 km/h in assenza di vento)	MP4/MOV (H.264/H.265)
<b>Resistenza alla velocità del vento</b>	<b>Bit-rate max del video</b>
10,7 m/s (Livello 5)	150 MB/s
<b>Angolo massimo di inclinazione</b>	<b>Zoom</b>
Anteriore: 40°, Posteriore: 35° (Modalità S) 25° (Modalità N) 25° (Modalità C)	4K: 2x 2.7K: 3x FHD: 4x
<b>Massima velocità angolare (predefinita)*</b>	<b>Sistema dei sensori</b>
130°/s (Modalità S) * Può essere regolata tra 20°/s e 250°/s nell'app 75°/s (Modalità N) * Può essere regolata tra 20°/s e 120°/s nell'app 30°/s (Modalità C) * Può essere regolata tra 20°/s e 60°/s nell'app	<b>Frontale</b>
<b>Temperatura operativa</b>	Distanza di misurazione di precisione: 0,39 - 25 m Reattività effettiva del sensore: velocità di volo <10,5 m/s FOV: orizzontale 106°, verticale 90°
Tra -10° e 40° C (14° - 104° F)	<b>Posteriore</b>
<b>Global Navigation Satellite System (GNSS)</b>	Distanza di misurazione di precisione: 0,36 - 23,4 m Reattività effettiva del sensore: velocità di volo <8 m/s FOV: orizzontale 58°, verticale 73°
GPS + Galileo + BeiDou	<b>Inferiore</b>
<b>Frequenza operativa</b>	Altezza di misurazione: TUF: 0,15 - 9 m Intervallo di stazionamento GS: 12 m Intervallo di stazionamento con sensore visivo: 0,5 - 30 m Velocità di rilevamento effettiva: velocità di volo <3 m/s FOV: In avanti/indietro 104,8°, a sinistra/la destra a 87,6°
2.400 - 2.4835 GHz 5.725 - 5.850 GHz <sup>[3]</sup>	<b>Luce ausiliaria inferiore</b>
<b>Potenza del trasmettitore (EIRP)</b>	N/D
2,4 GHz: <26 dBm (ECC), <20 dBm (CE/SRRC/MCC) 5,8 GHz: <26 dBm (ECC/SRRC), <11 dBm (CE)	<b>Ambiente operativo</b>
<b>Accuratezza del volo stazionario</b>	Superfici riflettenti diffuse con un motivo chiaro e riflettività >20% (come pavimentazioni in cemento) Luce adeguata (lux > 15, ambiente di esposizione normale di una lampada fluorescente per interni)
Verticale: ±0,1 m (con posizionamento visivo) ±0,5 m (con posizionamento GNSS) Orizzontale: ±0,3 m (con posizionamento visivo) ±1,5 m (con posizionamento GNSS)	

Figura 5: Scheda Tecnica DJI Mini 3 PRO

Il secondo multirottore selezionato dalla categoria dei Mini Droni è il DJI Mavic 2, che è proposto in varie versioni in base all'equipaggiamento. La dotazione standard prende il nome di Mavic Air 2 [9] ed è munita di un sensore 1/2", che fornisce una qualità di immagine fino ad 8K, di un sistema anticollisione frontale, posteriore e inferiore e possiede una batteria che garantisce un'autonomia di 34 minuti, tutto ciò per circa 849€. La versione Mavic 2 Enterprise Advanced [10] è dotata invece di telecamere termiche M2EA con zoom digitale fino a 16x e modulo RTK per un posizionamento di precisione centimetrica. La precisione termica è di  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  e permette di avere una misurazione molto accurata della area di riferimento. Inoltre, il sistema di rilevamento ostacoli omnidirezionale fa sì che il drone sia in grado di volare in qualsiasi ambiente. Il peso variabile da 909g fino a 1100g con i payload, unito alla batteria di volo intelligente da 3850 mAh, gli consentono un range di autonomia da 24 minuti col payload più impegnativo energeticamente fino a 31 minuti in configurazione base.



Figura 6: *DJI Mavic 2 Enterprise Advanced*

## Aeromobile

Peso al decollo (senza accessori)	909g
Peso massimo al decollo	1100 g
Dimensioni	Richiuso: 214×91×84 mm Aperto: 322×242×84 mm Aperto+riflettore: 322×242×114 mm Aperto+lampeggiante: 322×242×101 mm Aperto+altoparlante: 322×242×140 mm
Distanza diagonale	354 mm
Massima velocità di salita	6 m/s (modalità S) 4 m/s (modalità P) 4 m/s (modalità S con accessori) 4 m/s (modalità P con accessori)
Massima velocità di discesa	Discesa verticalmente 5 m/s (Modalità S) 4 m/s (Modalità P) Inclinazione 7 m/s (modalità S) 4 m/s (Modalità P)
Velocità massima	72 km/h (modalità S, senza vento) 50 km/h (modalità P, senza vento)
Quota massima di tangenza	6000 m
Autonomia di volo	31 min (misurato durante il volo a 25 km/h in assenza di vento) 28 min (modulo RTK collegato) 29 min (con faro acceso) 30 min (con faro spento) 24 min (con riflettore acceso) 28 min (con riflettore spento) 27 min (con altoparlante acceso) 28 min (con altoparlante spento)
Resistenza alla velocità del vento	10 m/s (scala 5)
Angolo massimo di inclinazione	35° (modalità S, con radiocomando) 25° (modalità P)
Massima velocità angolare	200°/s (Modalità S) 100°/s (Modalità P)
Temperatura operativa	tra -10 °C e 40 °C
GNSS	GPS+GLONASS
Accuratezza del volo stazionario	Verticale: ±0,1 m (con RTK) ±0,1 m (con posizionamento visivo)±0,5 m (con posizionamento GPS)  Orizzontale: ±0,3 m (con posizionamento visivo) ±1,5 m (con posizionamento GPS)
Frequenza operativa	2.400-2.4835 GHz; 5.725-5.850 GHz
Potenza del trasmettitore (EIRP)	2.400 - 2.4835 GHz FCC: ≤26 dBm; CE: ≤20 dBm; SRRC: ≤20 dBm; MIC: ≤20 dBm 5.725 - 5.850 GHz FCC: ≤26 dBm; CE: ≤14 dBm; SRRC: ≤26 dBm
Memoria interna	24 GB

## Termocamera M2EA

Sensore	Microbolometro VOx non raffreddato
lunghezza focale	,ca 9mm 35 mm formato equivalente: ca. 38 mm
Risoluzione del sensore	640×512 @30Hz
Intervallo scena	-40 - 150 °C (alto guadagno)
Zoom digitale	32 x
Interasse	12 µm
Banda spettrale	8-14 µm
Formato foto	RJPEG
Formato video	MP4
Metodo di misurazione	Misurazione parziale, misurazione area
FFC	Auto/Manuale

## Fotocamera visiva M2EA

Sensore	m1/2" CMOS; pixel effettivi: 48 MP
Obiettivo	FOV: 84° Formato 35 mm equivalente: 24 mm Apertura: f/2.8 Distanza di ripresa: 1 m a ∞
Intervallo ISO	Video: 100-12800 (automatico) <b>Foto: 100-1600 (automatico)</b>
Zoom digitale	<b>32x</b>
Dimensione massima dell'immagine	<b>8.000×6.000</b>
Modalità fotografiche	<b>Intervallo scatto singolo: 2/3/5/7/10/15/20/30/60 s</b> <b>Panorama: sfera</b>
Risoluzione video	<b>3840×2160@30fps</b> <b>1920×1080@30fps</b>
Formato foto	JPEG
Formato video	MP4

## Sistema dei sensori

Sistema dei sensori	Rilevamento ostacoli omnidirezionale[1]
Frontale	Intervallo di misurazione di precisione: 0,5 - 20 m Distanza di rilevamento: 20 - 40 m Reattività effettiva del sensore: ≤ 14 m/s Campo visivo (FOV): Orizzontale: 40°, verticale: 70°
Posteriore	Distanza di misurazione di precisione: 0,5 - 16 m Distanza rilevabile: 16 - 32 m Velocità di rilevamento effettiva: ≤ 12 m/s FOV: Orizzontale: 60°, verticale: 77°
Superiore	Intervallo di misurazione di precisione: 0,1 - 8 m
Inferiore	Intervallo misurazione di precisione: 0,5 - 11 m Distanza rilevabile: 11 - 22 m
Laterale	Distanza di misurazione di precisione: 0,5 - 10 m Reattività effettiva del sensore: ≤ 8m/s Campo visivo (FOV): Orizzontale: 80°, verticale: 65°

Figura 7: Scheda Tecnica Mavic 2 Enterprise Advanced



### 3.4: Droni progettati per uso indoor industriale

Per quanto riguarda i droni creati appositamente per ispezioni industriali indoor, un primo esempio è stato progettato da Multinnov [11], un'azienda francese specializzata nella costruzione di dispositivi per ispezioni in spazi chiusi. Il prodotto descritto in questo elaborato è lo "Stereo 2" [12], progettato appositamente per volare in spazi stretti. Quest'ultimo, infatti, è dotato di un sistema di illuminazione a led da 12,000 lumen e di sensori ottici per mantenere una distanza di sicurezza con l'ambiente circostante. È inoltre dotato di una gabbia protettiva che mantiene al suo interno tutti i rotori e i sensori ottici per la video ispezione e l'anticollisione. Il suo diametro di 39cm, progettato appositamente per volare in spazi stretti, unito ad un software capace di eliminare i disturbi visivi dati dalla polvere alzata dai rotori e alla enorme capacità di illuminazione, lo rende una macchina perfetta per ispezionare siti industriali, spesso pieni di pulviscolo. Il sistema di stabilizzazione, data la mancanza del GPS in questi ambienti, ha costretto la casa produttrice a sviluppare un sistema di controllo ottico in grado di salvare i movimenti ed inviarli all'operatore per ricostruire una mappa 3D. Grazie a questo sistema di telecamere, il multirottore può prendere come riferimento una parete e seguirla ad una distanza prestabilita in modo da ispezionarla interamente. La telecamera principale è in grado di fornire immagini e video in 4K con FOV di 170° diagonali e 140° orizzontali ed è capace di ruotare di 180°. L'autonomia risente in modo considerevole della presenza di questi sensori e dispositivi di illuminazione, la riducendola a circa 12 minuti, che tuttavia rimane una delle migliori della sua categoria. Il prezzo non è presente sul sito ufficiale, ma guardando sul web [13] si può constatare che si aggira sugli 11.495€.

STEREO 2 BATTERY	
Capacity	5000mah
Type	LiPo
Nominal voltage	14.8v (4S)
Energy	74Wh
Charging time	1hour (1C)
Weight	1.05lbs - 480g
Operating temperatures	-4°F à 104°F -20°C à 40°C

Figura 8: Stereo 2 Batteria

AIRCRAFT				CAMERA		LIGHTING SYSTEM	
Configuration	Quadcopter	Noise level	80db(A)	Sensor	4K, Sony IMX117 1/2.3 inches 12MP	total power	12 000 lumens
Motors	1950kv motors x 4	Maximum speed	Slow 1.60 ft/s 0.5 m/s Medium 3.28 ft/s 1 m/s High 4.92 ft/s 1.5 m/s	Video format	MP4	Power per panneau	2 000 lumens
Propellers	5 inches triblades propellers x 4 3 inches pitch	Maximum pitch angle	15° loiter / alt-hold	Picture format	JPG	Control	4 modes available
Autonomy	12 minutes	Stabilization sensors	Stereoscopic camera 6 multibeam lidars	Video recording max resolution	3840/2160 - 30FPS (4k)		All - use all LED panels
Empty weight	1.98lbs - 900g	Protection rating	Splash and dust resistant	Video streaming resolution	1920/1080 - 30FPS (HD)		Dust - indirect lighting. Use side LED panels
Takeoff weight	3.08lbs - 1400g			Picture resolution	3840 / 2160 (4K)		Right/left - use corresponding LED panels
Maximum diameter	15,35" - 39 cm			FOV	170° diagonal 140° horizontal	Distribution of the illumination	Dust - 8000lm illumination on 180° without hot spot
Hardware	Carbon, SLS			Lens	1.9mm - hard focus		All - 180° illumination + 4000lm 90° focus
Operating temperatures	-4°F to 104°F -20°C to +40°C			ISO	Automatic		Right/left - 4000lm illumination on 90° corresponding to the chosen side
Flight modes	Loiter / Altitude Hold			File saving	MicroSD card (on board the drone) Class 10 minimum	CAGE	
Fail safe	Auto land on radio failsafe			Supported SD card	32-64GB(Suggested capacities)	Hardware	Carbon, rubber
Operating frequencies	2 400 to 2 483 MHz			Supported format	FAT 32	Resistance	4,92 ft/s on flat surface (1.5m/s)
EMC	2.4ghz 20dbm (CE) 23dbm(FCC)					Weight	0.23lbs - 105 g
						Part replacement average time	< 1 minute - no tools

Figura 9: Scheda Tecnica Stereo 2

Un'altra azienda specializzata in questo tipo di multirotori, è la Flyability, la quale sta cercando di sviluppare la tecnologia in modo differente da molti altri produttori.

“Al contrario di molti produttori di droni, noi abbiamo deciso di non concentrarci sullo sviluppo di una soluzione in grado di rilevare ed evitare gli ostacoli. Al contrario, stiamo lavorando per aumentare la tolleranza dei droni alle collisioni.” [14]

Questa filosofia di pensiero ha permesso di implementare un algoritmo di volo molto tollerante alle collisioni, facendo così diventare l'Elios 2 la principale soluzione prodotta per video ispezioni in spazi confinati. Un'implementazione software e hardware caratteristica di questo dispositivo è la capacità di invertire la rotazione dei motori durante le collisioni, evitando così il capovolgimento del drone. Pur puntando molto sulla resistenza agli impatti tramite algoritmi di stabilizzazione, questo drone è dotato di sette sensori di stabilità designati specificatamente per il volo in spazi ristretti senza la possibilità di usare il GPS. Ad essi si aggiunge la gabbia protettiva che circonda il drone e che gli definisce la dimensione massima di 40cm. Queste dotazioni lo rendono praticamente immune a qualsiasi tipo di danno che può derivare dal normale utilizzo. L'illuminazione a led da 10.000 lumen, posizionata in modo da avere un fascio obliquo sulle pareti, insieme alla telecamera ad alta risoluzione e alla termocamera, permette di

vedere tutte le imperfezioni e problematiche delle superfici da ispezionare. Anche in questo caso il drone è dotato di un software di correzione video per eliminare i disturbi dovuti alla polvere sollevata dalle eliche. Una caratteristica speciale di questo drone è la capacità di montare un rilevatore di radiazioni nucleari, potendo così creare una mappa interattiva della loro distribuzione senza dover impiegare risorse umane. L'autonomia, anche in questo caso, risente della presenza dei molteplici sensori e dell'impossibilità di montare una batteria di maggiore dimensione, raggiungendo un massimo di circa 10 minuti. Il prezzo di questo drone varia significativamente in base al pacchetto di accessori che vengono forniti, partendo da una base di 30,540€ fino ai 57,240€ del pacchetto completo.

AIRCRAFT		SMART BATTERY	
<b>CONFIGURATION</b>	Quadcopter	<b>FLIGHT CONTROL SENSORS</b>	IMU, magnetometer, barometer, 7 vision and distance sensors
<b>DIMENSIONS</b>	Fits in a < 400 mm sphere; 15.75 in	<b>MATERIALS</b>	Carbon fiber composites, magnesium alloy, aeronautical grade aluminum, high-quality thermoplastics
<b>MOTORS</b>	4 fast reversing electric brushless motors	<b>OPERATING TEMP.</b>	0 °C to 50 °C* ; 32 °F to 122 °F
<b>PROPELLERS</b>	4 propellers, 5 inches	<b>FLIGHT MODES</b>	OPTI - Assist Mode ATTI - Attitude mode SPORT - Sport mode
<b>TAKE-OFF WEIGHT</b>	< 1450 g ; < 3,2 lbs Includes battery, payload & protection	<b>FAIL SAFE</b>	Auto-landing on signal lost
<b>MAX FLIGHT TIME</b>	Up to 10 min	<b>OPERATING FREQUENCY</b>	2404 – 2483 MHz (UAV to RC)
<b>MAX ASCENT SPEED</b>	1.5 m/s ; 5 ft/s	<b>EIRP</b>	2.4 GHz: ≤ 32 dBm (FCC); ≤ 20 dBm (CE); ≤ 10 dBm/MHz (MIC)
<b>MAX DESCENT SPEED</b>	1 m/s; 3,3 ft/s	<b>INGRESS PROTECTION</b>	Splash and dust resistant
<b>MAX SPEED</b>	1.3 m/s (Assist Mode) ; 4,25 ft/s 4 m/s (Attitude mode) ; 13.12 ft/s 6.5 m/s (Sport mode) ; 19.69 ft/s	<b>NOISE LEVEL</b>	99 dB(A) hover 120 dB(A) max @ 1m
<b>MAX PITCH ANGLE</b>	0.15 rad (Attitude mode) 0.2 rad (Assist Mode) 0.3 rad (Sport mode)		
<b>MAX WIND RESISTANCE</b>	3 m/s (Assist Mode) ; 9,85 ft/s 5 m/s (Sport mode) ; 16,4 ft/s		
		<b>RATED CAPACITY</b>	5200 mAh
		<b>NOMINAL VOLTAGE</b>	19 V
		<b>BATTERY TYPE</b>	LiPo 5S HV Smart Battery: - Improved safety (protection for: overcharge, overcurrent, over/under-temperature) - Plug-and-play charging - Self-balancing - Storage self-discharge - State-of-Charge estimation - Cycle counter - Battery ID
		<b>ENERGY</b>	98.8 Wh
		<b>CHARGING TIME</b>	1.5 h
		<b>BATTERY CHANGE TIME</b>	< 1 min
		<b>COMPLIANCE</b>	Approved for carry-on luggage. Complies with IATA Dangerous Good Regulation.
		<b>NET WEIGHT</b>	550 g ; 1,2 lbs
		<b>OPERATING TEMPERATURE</b>	0-50°C *

Figura 10: Scheda tecnica Elios 2

Nel 2022 Flyability ha annunciato l'uscita del più nuovo e aggiornato Elios 3 [16], che vanta un design rinnovato. Il sensore LiDAR per la mappatura di interni, combinato con un potente motore grafico NVidia [17], permette al drone di generare mappe 3D in tempo reale e percepire in modo istantaneo l'ambiente circostante. Il nuovo sistema di stabilizzazione, basato sulla tecnologia SLAM (Simultaneous localization and mapping), cattura i movimenti più impercettibili causati dai disturbi esterni e fornisce al controllore di volo istruzioni su come compensarli. Ciò permette al multirottore di volare efficacemente in ambienti con condizioni sfavorevoli, senza necessità di particolari abilità

del pilota. Il LiDAR integrato invia direttamente la mappa 3D generata allo schermo dell'operatore, in modo che egli sia consapevole del posizionamento del drone in tempo reale e si accorga di eventuali problemi con la scansione. Il vano di carico modulare di questo mezzo supporta il collegamento di un payload aggiuntivo insieme al sensore LiDAR, permettendo l'aggiunta di svariati dispositivi utilizzabili durante il compimento del lavoro. Anche l'Elios 3 è dotato della tecnologia di inversione della rotazione dei motori e di una gabbia protettiva e la certificazione IP-44 [18], che assicura la protezione del dispositivo da polvere e schizzi d'acqua. L'autonomia di questo multirobot varia in base al payload.

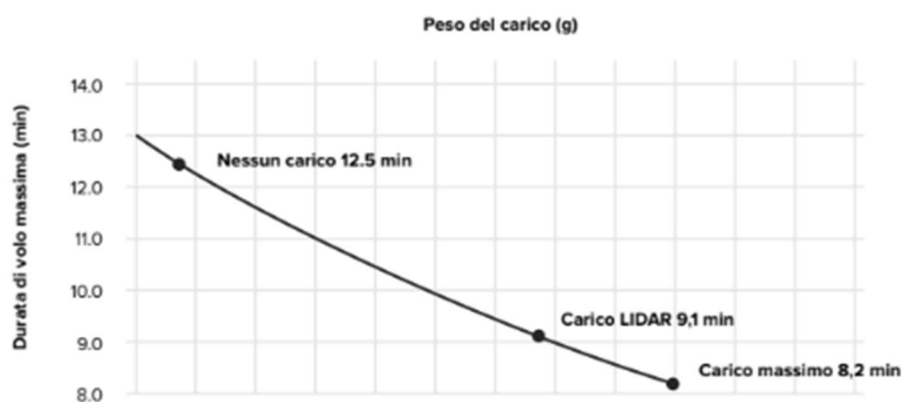


Figura 11: Grafico Autonomia Elios 3

Il prezzo di questo drone non viene riportato sul sito ufficiale, ma si suppone la possibilità di comprarlo con una selezione di accessori e componenti di ricambio come per il fratello minore Elios 2.

■ AIRCRAFT

Configuration	Ducted fan quadcopter
Data interface	USB C port using Inspector (requires drone to be powered by its battery)
Dimensions	48cm wide; 18.9 in 38cm high; 13.8 in
Flight control sensors	IMU, magnetometer, barometer, lidar, 3 computer vision camera and ToF distance sensor
Flight modes	ASSIST - Stabilized mode ATTI - Attitude mode SPORT - Sport mode
Flight Time E3 base	>12min30s'

Flight Time E3 base + lidar mapping payload	>9 min**
Ingress Protection	Base platform + basic inspection payload: Splash and dust resistant design, equivalent to at least IP44 LIDAR Payload: IP68
Mass E3 base	1900 g +/-10g ; < 4.18 lbs Includes battery, payload & protection
Mass E3 base + lidar mapping payload	2350 g +/-15g ; < 5.2 lbs Includes battery, payload & protection and lidar payload

Materials	Carbon fiber - kevlar composites, magnesium alloy, aeronautical grade aluminum, high-quality thermoplastics
Max ascent / descent Speed	2 m/s ; 6.6 ft/s (Assist / Atti modes)
Max horizontal speeds in different flight modes and configurations	2 m/s (Assist mode) ; 6.6 ft/s 5 m/s (Attitude mode) ; 16.4 ft/s 7 m/s (Sport mode) ; 23 ft/s
Max Take-off mass	2500 g (E3 base + 600g / E3 LIDAR + 150g)
Max Wind Resistance	5 m/s (Assist mode) ; 16.4 ft/s 7 m/s (Sport mode) ; 23 ft/s

Motor life time	50h (Test run to 120 hours, motors reached 100h with negligible degradation so specification is 50% of nominal life)**
Motor type	4 fast reversing electric brushless motors
Noise Level	83 dB(A) with lidar
Onboard computer	Nvidia Xavier NX onboard computer with custom linux OS
Operating temp.	0 °C to 50 °C ; 32 °F to 122 °F Valid for batteries pre-condition between 10°C and 40°C

■ AIRCRAFT

Propeller life time	10h
Propellers	4 propellers, 5 inches
Standby time on full battery	5000h or ~7 months

■ SMART BATTERY

Battery change time	< 10s by means of plug and play battery mechanism
Battery life time	50 flights
Battery shelf time	250 days when stored at ~20°C and at 50% SOC
Battery Type	LiPo 6S HV Smart Battery: - LED, button and user interface for SOC monitoring, etc. - Improved safety during charge cycle (protection for: overcharge, overcurrent, overvoltage, over/under-temperature) - Accurate state-of-health and state-of-charge estimation - Plug-and-play charging - Self-balancing - Storage self discharge - Cycle counter - Battery ID

■ LIGHTING SYSTEM

Control	From remote controller, adaptive light beam controlled by camera pitch
Light Output, extreme	Temporary Peak Power: - max 100W - 16000 Lumen
Light Output, Nominal	Normal mode - 20W default, 1x E2 max illumination. >> Working up to >50°C without thermal throttling - 40W boost, ~2x E2 max illumination >> Working up to 30°C without thermal throttling

Light Output, Nominal	Dust mode - default is equivalent to 1x E2 max illumination. - Throttling temperature >30°C
Modes	Normal mode (4x panels used) Dustproof lighting (2x outer panels used only) Selective/oblique lighting (left or right side only)
Type	High-efficiency LEDs for even lighting in front, top and bottom, optimized for low impact of dust on picture quality.

■ LIDAR PAYLOAD

Lidar sensor	Ouster OS0-32 beams sensor
--------------	----------------------------

06 • Elios 3 • Technical Specifications

■ PAYLOAD CHASIS

Camera Pod Downward tilt	-90 degrees
Camera Pod Upward tilt	+90 degrees
Payload head	Damped for vibrations

File Storage	MicroSD card (onboard the aircraft) Max capacity: 128 GB Recommended model: Sandisk Extreme micro SDXC UHS-I V30
Ground sample distance	minimum 0.18mm/pix at 30cm
Lens	2.71 mm focal length Fixed focal
Movie FOV	114° horizontal, 131° diagonal
Photo Formats	JPG
Photo FOV	119° horizontal, 149° diagonal

Photo Recording Resolution	4000 x 3000, up to 40 pictures during flight
Sensor	1/2.3" CMOS Effective Pixels: 12.3 M Sensitivity: Optimized for low light performance
Supported File System	FAT32 for cards up to 32 GB, exFAT for cards bigger than 32 GB. Up to 128GB card size.
Total vertical FOV	approximately 244° including camera tilt including 180°C without obstruction
Video Formats	MOV
Video Recording Resolutions	4k Ultra HD: 3840 x 2160 at 30 fps FHD: 1920 x 1080 at 30 fps

Video Streaming Resolution	FHD: 1920 x 1080 at 30 fps
----------------------------	----------------------------

■ MAIN CAMERA

Control modes	Auto mode with manual EV compensation
---------------	---------------------------------------

■ THERMAL CAMERA

Lens	FOV 56° x 42°, Depth of field 15cm to infinity
Sensitivity (NEΔT)	<50 mK
Sensor	Lepton 3.5 FLIR
Video Recording Resolution	160 x 120 at 9 fps
Wavelength (LWIR)	8-14 μm

Figura 12: Scheda Tecnica Elios 3

## 4) Sensoristica per volo indoor e mappatura di interni

### 4.1: Principali sensori per sistemi anticollisione e misurazioni industriali

I sensori utilizzati nei sistemi anticollisione, si sono largamente diffusi non solo in ambito aeronautico ma anche in ambito automobilistico, grazie alla nascita sia dei primi sistemi di assistenza alla frenata di emergenza, sia dei nuovissimi software di guida autonoma che, in alcuni casi, eliminano la necessità del guidatore all'interno del veicolo. Questi si differenziano in base alla tecnologia utilizzata e sono realizzabili grazie all'implementazione di vari sensori. Quelli implementabili sui droni, possono essere molteplici, partendo dai classici ad ultrasuoni fino ai più costosi e complessi LiDAR. I sensori ad ultrasuoni, come dice il nome stesso, sono in grado di individuare oggetti presenti nel loro raggio di azione e calcolarne la distanza in modo da avvertire il controllore di volo del pericolo. Questi sono molto diffusi nel settore automobilistico, in quanto necessitano di un certo spazio e vengono utilizzati principalmente durante le manovre di parcheggio, quando ci si avvicina ad eventuali ostacoli.



Figura 13: Sensore ad Ultrasuoni [19]

Questi sensori inviano onde sonore nel campo degli ultrasuoni e misurando il tempo di volo riescono a determinare in modo continuo e con precisione la distanza dall'oggetto. Un altro sensore in grado di svolgere questo compito è il *Rangefinder*, o telemetro in italiano [20], che può utilizzare la tecnologia LiDAR o laser per compiere le misurazioni. Il telemetro laser sfrutta l'emissione di un fascio luminoso calcolandone il tempo di ritorno e, conoscendo la velocità della luce in aria, ne deduce la distanza. Il principio di funzionamento reale di questi dispositivi non si basa sull'effettivo tempo di volo, in quanto servirebbe un ricevitore di una precisione enorme per poter fornire risultati attendibili, ma nella realtà viene misurata la frequenza di auto oscillazione del sistema. Nella pratica si tratta di utilizzare un sensore ottico che smorza il raggio laser, provocando

la riaccensione dell'emettitore e facendo ricominciare il ciclo. Questa tecnologia è stata miniaturizzata nel tempo fino ad essere utilizzata anche sui droni, come nell'Elios 2 ed Elios 3.

Per quanto riguarda i sensori ottici equipaggiabili sui droni abbiamo le termocamere [21], ovvero delle particolari telecamere sensibili alla radiazione infrarossa. I dati in ingresso vengono trasformati in delle vere e proprie mappe di temperatura delle aree nel quale avviene la misurazione. Le termocamere si differenziano molto in base a vari parametri, come il tipo di sensore, il campo spettrale, ovvero la frequenza della radiazione misurata, la risoluzione geometrica, la frequenza di acquisizione e la divisione in termocamere radiometriche e non radiometriche. Riguardo queste ultime la differenza è che le prime possono misurare il valore di temperatura assoluto in ogni punto dell'immagine, al contrario delle seconde. Alcuni droni nascono con una termocamera integrata, come il Mavic 2 Enterprise Advanced, l'Elios 2 e l'Elios 3, mentre altri hanno la possibilità di essere equipaggiati con dispositivi aggiuntivi progettati appositamente dalle aziende per uso industriale. A tal proposito, la DJI ha prodotto una serie di sensori ottici e strumenti aggiuntivi da poter utilizzare sui propri droni. Questa serie è denominata Zenmuse e comprende una vasta gamma di allestimenti con sensori ottici per effettuare riprese in qualsiasi condizione di luce, telemetri laser, termocamere e sensori LiDAR. Per quanto riguarda le telecamere termiche il dispositivo di riferimento è lo Zenmuse H20N [22], il quale possiede due termocamere radiometriche, una fotocamera grandangolare a visione notturna, una fotocamera con zoom a visione notturna e un rilevatore laser della distanza fino a 1200 metri. Lo Zenmuse H20N è compatibile con droni come il sopracitato Phantom 4 PRO V2 e il Matrice 300 RTK. Sul sito ufficiale DJI è venduto a circa 12.810€.



Termocamera grandangolare a infrarossi

Imager termico	Microbolometro VOx non raffreddato
Obiettivo	DFOV: 12,5° Lunghezza focale: 44,5 mm (lunghezza focale equivalente: ca. 196 mm) Apertura: f/1.2 Messa a fuoco: da 45 m a ∞
Imager termico	Microbolometro VOx non raffreddato
Obiettivo	DFOV: 45,5° Lunghezza focale: 12 mm (lunghezza focale equivalente: ca. 53 mm) Apertura: f/1.0 Messa a fuoco: da 5 m a ∞

Rilevatore laser

Lunghezza d'onda	905 nm
Potenza massima	3,5 mW
Larghezza del singolo impulso	6 ns
Accuratezza di misurazione	± (0,2 m + distanza dall'obiettivo x 0,15%)
Intervallo di misurazione	3-1.200 m (superfici verticali 0,5 x 12 m con il 20% di riflettività)

Figura 14: Zenmuse H20N, Caratteristiche Termocamere e Telemetro

In questo elaborato si è spesso parlato di sensori LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging [23]), sensori ottici che sfruttano come sorgente luminosa un raggio laser. Come i telemetri inviano una sorgente luminosa verso la superficie o l'oggetto e ne misurano la distanza, calcolando il tempo trascorso tra l'invio e la ricezione del segnale. Il principio di funzionamento è praticamente identico a quello del radar che invece di un laser invia onde radio. Il fascio luminoso utilizzato ricade nella lunghezza d'onda della luce ultravioletta, ciò permette di individuare e localizzare particelle molto piccole, come il particolato in sospensione nelle nuvole, rendendo questi sensori molto diffusi in meteorologia. Ad esempio, i sensori LiDAR hanno preso sempre più piede, grazie alla loro enorme versatilità e praticità di impiego, in geologia e sismologia. In particolare, essi sono utilizzati per controllare i movimenti geologici, monitorare faglie, o ghiacciai, in quanto possono individuare eventuali crescite o diminuzioni. Molti satelliti sono equipaggiati con questa tecnologia, come per esempio l'ICESat [24] della NASA [25].

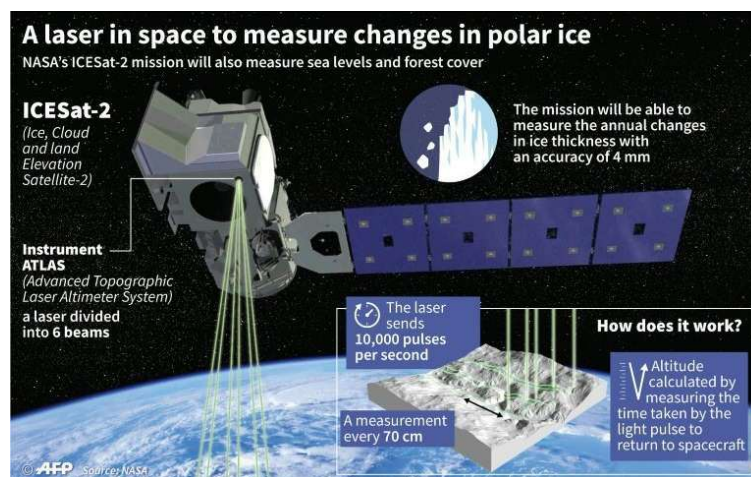


Figura 15: ICESat della NASA

I LiDAR in campo aeronautico hanno trovato impieghi molteplici, come la misurazione della biomassa di foreste o come misuratori della velocità dei venti atmosferici. La tecnologia definita Doppler, derivata appunto dall'implementazione dell'effetto doppler nella strumentazione, ovvero la variazione apparente della frequenza o della lunghezza dell'onda percepita da un osservatore raggiunto dall'onda stessa emessa da una sorgente che si muova rispetto all'osservatore [26]. Questa tipologia viene impiegata anche nel campo dell'energia rinnovabile per acquisire dati su direzione e velocità del vento, sulla presenza di turbolenze e per la predizione delle raffiche.



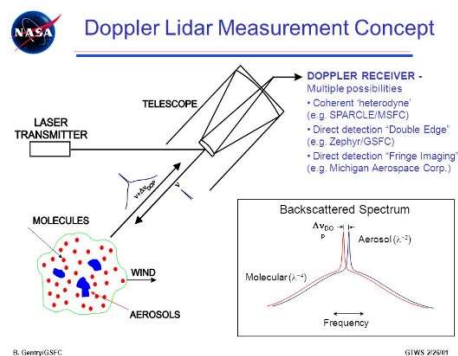


Figura 16: *LiDAR Doppler*

L'uso dei LiDAR è presente anche nel campo automobilistico per quello che riguarda i sistemi a guida autonoma. Infatti, le aziende automobilistiche stanno implementando sistemi sempre più sofisticati, come nell'esempio della Volvo EX90 [27]. Anche nel campo dei droni si stanno affermando sempre di più, in quanto possono essere utilizzati sia come sistemi di mappatura di ambienti, come nel caso dell'Elios 3, sia come sistemi di misurazione e controllo utilizzati soprattutto nel campo dell'agricoltura.



Figura 17: *LiDAR su Volvo EX90 e LiDAR in Campo Agricolo*

Per quanto riguarda i sensori LiDAR, come detto, ne esistono una grande varietà in base al tipo di utilizzo. Sui droni solitamente vengono impiegati per effettuare mappature di ambienti e per creare sistemi di navigazione autonomi. Il primo tipo è implementato soprattutto a livello industriale, per effettuare rilevazioni dettagliate di impianti industriali internamente ed esternamente. La soluzione proposta da DJI fa sempre parte della serie Zenmuse e il dispositivo in questione è identificato con la sigla L1. Esso è equipaggiato con un modulo Livox LiDAR, un IMU e una fotocamera CMOS da 1". Questo sensore è in grado di generare modelli di nuvole di punti con colori reali grazie ad un FOV di 70°

e alla telecamera, mentre grazie all'integrazione del GNSS le ricostruzioni hanno una precisione accurata al centimetro.

Informazioni generali		Lidar	
Nome prodotto	Zenmuse L1	Precisione della distanza(RMS 1 $\sigma$ ) <sup>2</sup>	3 cm @ 100 m
Dimensioni	152×110×169 mm	Ritorni massimi supportati	3
Peso	930±10 g	Modalità di scansione	Modello di scansione non ripetitivo, modello di scansione ripetitivo
Alimentazione	Tipico: 30 W; Max: 60 W	FOV	Modello di scansione non ripetitivo: 70,4° (orizzontale) × 77,2° (verticale); Modello di scansione ripetitivo: 70,4° (orizzontale) × 4,5° (verticale)
Classificazione IP	IP54	Sicurezza laser	Classe 1(IEC 60825-1:2014) (Sicurezza degli occhi)
Aeromobile supportato	Matrice 300 RTK	<b>Fotocamera con mappatura RGB</b>	
Intervallo temperatura di funzionamento	Da -20°C a 50°C Da 0°C a 50°C(quando si utilizza la telecamera di mappatura RGB)	Dimensioni sensore	1 pollice (2,54 cm)
Intervallo temperatura di stoccaggio	Da -20°C a 60°C	Pixel effettivi	20 MP
<b>Prestazioni del sistema</b>		Dimensioni foto	5472×3078 (16:9); 4864×3648 (4:3); 5472×3648 (3:2)
Campo di rilevamento	450 m @ 80% di riflettività, 0 klx; 190 m @ 10% di riflettività, 100 klx	Lunghezza focale	8,8 mm/24 mm (equivalente)
Velocità in punti	Ritorno singolo: max. 240.000 punti/s; Ritorno multiplo: max. 480.000 punti/s	Velocità dell'otturatore	Velocità dell'otturatore meccanico: 1/2000 - 8 s Velocità dell'otturatore elettronico: 1/8000 - 8 s
Precisione del sistema(RMS 1 $\sigma$ ) <sup>1</sup>	Orizzontale: 10 cm @ 50 m; Verticale: 5 cm @ 50 m	ISO	Video: 100 - 3200 (Auto), 100 - 6400 (Manuale) Foto: 100 - 3200 (Auto), 100 - 12800 (Manuale)
Modalità di colorazione delle nuvole di punti in tempo reale	Colore reale; colorazione per riflettività; colorazione per elevazione	Intervallo apertura	f/2,8 - f/11
		File system supportato	FAT (≤32 GB); exFAT (>32 GB)
		Formato foto	JPEG
		Formato video	MOV, MP4
		Risoluzione video	H.264, 4K: 3840×2160 30p

Figura 18: Zenmuse L1 Scheda Tecnica

L'Elios 3 è equipaggiato con un sensore LiDAR per la mappatura di interni fornito dall'azienda Ouster [29] denominato OS0, il quale è studiato appositamente per creare mappe 3D di ambienti con scarsa illuminazione grazie ad un range di 35 metri e ad un FOV di 90° verticale e 360° orizzontale. L'OS0 è costruito in più varianti in base al numero di canali. L'OS0-32 è quello montato di serie sull'Elios 3, è capace di acquisire fino a 1.3 milioni di punti al secondo, di trasmettere una quantità di dati superiore a 80 Mbps alla massima risoluzione ed è dotato internamente di un IMU con 3 giroscopi e 3 accelerometri. Il consumo di corrente si aggira sui 14-20 W che arrivano a 28W di picco all'accensione con una temperatura esterna inferiore ai -40°C. Il prezzo non è citato sul sito ufficiale, ma si può trovare in vendita ad un costo superiore ai 4.000€.

## 5) Implementazione e impieghi futuri

### 5.1: *Dagli inizi ad oggi*

Fin dalla loro nascita i droni sono stati utilizzati principalmente per sostituire il lavoro di una persona e farlo svolgere ad una macchina, senza correre rischi e risparmiando una grande quantità di tempo e denaro. Come detto nel primo capitolo, i droni venivano utilizzati come mezzo per l'addestramento dei piloti militari, rimuovendo così la necessità di addestrare altri piloti, far volare altri aerei, che hanno costi di manutenzione, ed evitare di mettere in pericolo gli stessi. Andando avanti con gli anni, infatti, si può notare come la missione principale di questi dispositivi non consista più nel creare una tecnologia rivoluzionaria, ma di alimentare una fase di transizione nella quale si cerca di ridurre al minimo costi e rischi legati al personale. Infatti, la progettazione di questi dispositivi in ambito civile si è concentrata sia sull'utilizzo amatoriale e cinematografico, grazie alle riprese difficilmente ottenibili convenzionalmente, sia sullo svolgimento di mansioni industriali, di ricerca e di supervisione. Gli attuali impieghi lavorativi maggiormente influenzati dall'arrivo dei droni sono quelli che necessitano di controlli periodici, come nell'esempio del ICESat della NASA che mantiene monitorato il livello dei ghiacciai effettuando le dovute valutazioni per ogni scansione che effettua. Oltre a ciò, sono molto diffusi droni per ispezioni industriali, fotogrammetria, mappatura LiDAR, controlli termografici e controllo di superfici. Ne è un esempio l'innovativo multirobot dell'azienda canadese Skygauge Robotics [31], che è specializzato nell'effettuare le cosiddette misurazioni CND (controlli non distruttivi) ed è equipaggiato con un sensore ad ultrasuoni Olympus 38DL PLUS [33]. Questo gli permette di effettuare misurazioni ponendo la sonda direttamente a contatto con la superficie da ispezionare. Alcuni droni sono stati equipaggiati anche con sensori per analisi e campionamento delle acque, per i quali sono stati creati dispositivi appositamente progettati come il Nixie [34] e il Nero Poli [35]. La sempre maggiore necessità di svolgere molteplici compiti con un drone ha portato alcune aziende, in particolare la DJI, a sviluppare delle piattaforme in grado di adeguarsi a qualsiasi tipo di equipaggiamento. Inoltre, questo aspetto ha spinto le aziende che li progettano a crearli ad-hoc per questi droni: si tratta della serie DJI Matrice, in particolare le versioni M300 e M600. Questi multirobot dispongono entrambi del modulo RTK, il quale permette di navigare con precisione centimetrica e di effettuare rilevazioni a distanza di tempo sempre nello stesso punto per avere un riscontro più diretto possibile.

L'adattabilità di questi droni permette di poterli sfruttare in ampia maniera e in vari impieghi, rimuovendo così la necessità di comprare un multirottore per ogni compito. In questo modo si riducono enormemente i costi e si può addirittura fare affidamento ad associazioni esterne, specializzate nello svolgere operazioni del genere, permettendo alle aziende di risparmiare sulla formazione di personale e di non mettere a rischio risorse umane. Per quanto riguarda le ispezioni indoor in cui gli spazi a disposizione risultano limitati, ci si espone comunque al pericolo in caso di supervisioni in ambienti pericolanti o non sicuri.

## *5.2: Impieghi futuri*

L'estrazione mineraria è tuttora considerata una delle professioni più pericolose al mondo in quanto i lavoratori possono essere soggetti in ogni momento a crolli improvvisi, allagamenti e fughe di gas potenzialmente nocive. Fino a pochi anni fa, infatti, i lavoratori erano soliti possedere dei dispositivi in grado di riconoscere la presenza di questi gas nell'aria. Al giorno d'oggi, invece, l'avvento dei droni può portare ad una semplificazione di queste problematiche, in quanto sono stati avviati molti progetti per utilizzare multirotori equipaggiati con sensori adatti all'analisi dei gas presenti nell'atmosfera. Un esempio è il progetto sviluppato dalla Aurora Flight Sciences [36], una compagnia collegata alla famosa casa costruttrice di aeromobili Boeing [37], la quale ha sviluppato un velivolo a guida autonoma chiamato Odysseus [37], in grado di autosostenersi in volo anche fino ad un anno grazie alla corrente generata con i pannelli solari posti su tutta la struttura. Lo scopo di questo progetto consiste nell'effettuare rilevazioni a lungo periodo nelle zone alte dell'atmosfera riguardo la presenza di alcuni gas, come l'ozono. Questo progetto può essere riprodotto in maniera analoga anche per droni che esplorano le miniere, i quali equipaggiati con sensori LiDAR per la mappatura di interni e sensori per il rilevamento di alcuni gas nell'aria, possono creare delle mappe 3D evidenziando le aree con la maggior concentrazione di gas tossici e contemporaneamente controllare la sicurezza della struttura mineraria. La startup australiana Emesent [39], fondata nel 2018, si è contraddistinta per la produzione di droni e sensori specializzati nella fornitura di dati di alta qualità per mappare infrastrutture e ambienti minerari. Il loro dispositivo più all'avanguardia si chiama HOVERMAP ST-X [40], è dotato di un sensore LiDAR con 300 metri di range, una densità di circa un milione di punti al secondo ed è capace di catturare dettagli con grande accuratezza.



Figura 19: *Emesent HOVERMAP ST-X*

Un altro impiego nel quale i droni potrebbero rappresentare una svolta, è quello della ricerca e del soccorso in caso di terremoti e valanghe [42]. Infatti, questi dispositivi grazie alle ridotte dimensioni e alla grande agilità, sono in grado di raggiungere luoghi altrimenti inaccessibili in maniera veloce e sicura. Alcuni di essi possono essere equipaggiati con sistemi utili per la ricerca di dispersi in seguito a questi eventi naturali. Dopo una valanga [44], le operazioni di ricerca vengono necessariamente svolte a terra in quanto l'utilizzo di elicotteri a bassa quota potrebbe portare ad una nuova slavina. Sfruttando i droni, questo pericolo si riduce sostanzialmente a zero, in quanto la pressione dell'aria esercitata dalle eliche è enormemente inferiore. Inoltre, l'implementazione di dispositivi di comunicazione come altoparlanti con microfoni potrebbe permettere agli operatori di comunicare direttamente con le persone intrappolate nella neve e, dato il grande range operativo dei droni, ai soccorritori di sapere con precisione la strada più breve per arrivare ai dispersi. Lo stesso discorso può essere fatto per quanto riguarda la ricerca di persone in seguito a terremoti [45]. In questo caso, oltre a semplici metodi di comunicazione, si possono anche utilizzare delle termocamere per individuare la presenza di fonti di calore in profondità e concentrare le operazioni di soccorso in quelle aree. Inoltre, grazie alla capacità di comunicare in condizioni nelle quali risulta impossibile utilizzare dispositivi elettronici comuni, i soccorritori possono aiutare le vittime indicando procedure mediche da eseguire in attesa del loro arrivo.

I droni equipaggiati di modulo RTK [46] sono in grado di posizionarsi nello spazio con una precisione quasi assoluta. Infatti, la capacità di collocare oggetti in punti precisi è un requisito fondamentale nel campo della demolizione controllata di edifici. I multirotori, in questo caso, potrebbero svolgere il compito dei lavoratori, facendo rilevazioni precise e individuando il luogo perfetto dove posizionare le cariche esplosive. Inoltre, molti droni

sono capaci di sostenere carichi di diversi chilogrammi e sarebbero perfettamente in grado di collocare gli esplosivi autonomamente.

I multirotori, grazie alla possibilità di controllare la spinta generata su ogni motore, sono dotati di una grande agilità che permette loro di muoversi liberamente in ambienti con spazi limitati. Ad esempio, in caso di incendio all'interno di edifici, può capitare che le telecamere di sicurezza vengano messe fuori uso a causa di problemi alla rete elettrica, comportando la mancanza di informazioni sulla diffusione delle fiamme e sulla presenza di persone. In questo caso, i droni potrebbero essere utilizzati dalle squadre di soccorso per ispezionare gli ambienti e fare valutazioni sul livello di diffusione dell'incendio. Grazie alle termocamere, è inoltre possibile, analizzando la temperatura delle pareti e delle porte, capire se all'interno di una stanza sono presenti delle fiamme. Utilizzando invece sensori per l'analisi dell'aria [47], è possibile capire il livello di fumi derivati dalla combustione presenti nell'ambiente e di conseguenza stabilire la possibilità di inviare squadre di soccorso all'interno. Alcuni droni come il DJI Mavic 2 Enterprise Advance, possono essere equipaggiati con altoparlanti in grado di riprodurre suoni o messaggi stabiliti dall'operatore, permettendo ai soccorritori di comunicare con le persone intrappolate.

I passi avanti della tecnologia hanno permesso ai multirotori di inserirsi all'interno di molti ambiti lavorativi, diventando così una risorsa molto vantaggiosa dal punto di vista economico, riducendo costi e tempi operativi. Al giorno d'oggi, i droni sono destinati sempre di più a sostituire il personale addestrato nello svolgere lavori industriali e non, comportando una crescita esponenziale della loro diffusione e portando le aziende a considerarli una soluzione possibile per le loro problematiche.

## 6) Conclusioni

### 6.2: *Solo di passaggio...*

I droni, o APR, in un periodo di tempo relativamente breve, sono passati dall'essere uno strumento prevalentemente militare, ad essere dispositivi alla portata di tutti. Al giorno d'oggi, infatti, la maggior parte di essi è pensata per uso amatoriale e industriale, grazie alla possibilità di trasportare telecamere, che dopo essere state miniaturizzate, sono equipaggiabili anche nei dispositivi più piccoli.

Alcuni multirotori sono stati progettati appositamente per svolgere lavori industriali come video ispezioni outdoor e indoor, fotogrammetrie, mappature LiDAR e rilevazioni sulla condizione delle infrastrutture. A tal proposito, è stato fondamentale lo sviluppo di dispositivi in grado di aiutarli nel compimento delle loro mansioni, tra i quali troviamo quelli che permettono ai droni di volare in qualsiasi ambiente senza correre rischi eccessivi. I principali sono:

- Telecamere;
- Telemetri o *Rangefinder*;
- LiDAR;
- Sensori ad ultrasuoni.

L'avvento dei droni rappresenta una novità tecnologica destinata a diventare sempre più presente nella vita delle persone, semplificando il lavoro e lo svolgimento delle mansioni sopraccitate. Per esempio, arriveranno a sostituire alcuni mezzi di trasporto, come nel progetto avveniristico di Amazon di effettuare le consegne utilizzando dei multirotori comandati da un computer senza la necessità di operatori. Insomma, quello che porta a considerare i droni la tecnologia del momento e non la tecnologia del futuro, sta nella concezione stessa della loro creazione, ovvero un mezzo adibito alla sostituzione dell'uomo nel compimento di mansioni specifiche. Ciò, appunto, diventerà un concetto obsoleto nel momento in cui non ci sarà più bisogno di compiere queste attività, facendo così diventare i droni non più necessari. Questo avverrà solo quando la tecnologia avrà raggiunto un livello tale da non richiedere interventi esterni e, per esempio, le strutture saranno in grado di diagnosticare autonomamente la loro condizione e risolvere eventuali problematiche.

## Bibliografia

1. Vyas, K. (2020, Giugno 29). A Brief History of Drones: The Remote-Controlled Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Tratto da Interesting Engineering: <https://interestingengineering.com/innovation/a-brief-history-of-drones-the-remote-controlled-unmanned-aerial-vehicles-uavs>
2. Cradle of Aviation Museum Charles Lindbergh Blvd. (s.d.). Convertawings Model "A" Quadrotor. Tratto da Cradle of Aviation Museum and Education Center: [https://www.cradleofaviation.org/history/exhibits/exhibit-galleries/the\\_jet\\_age/convertawings\\_model\\_a\\_quadrotor.html](https://www.cradleofaviation.org/history/exhibits/exhibit-galleries/the_jet_age/convertawings_model_a_quadrotor.html)
3. Barnhart, R.K. and Marshall, D.M. and Shappee, E. Introduction to Unmanned Aircraft Systems. CRC Press, 2021.
4. European Aviation Safety Agency, Easy access Rules for Unmanned Aircraft system (Regulation (EU) No 2019/947), 2022, pp. 390.
5. Drone class Blog, Regolamento europeo droni: <https://patentino-drone.it/blogs/notizie/regolamento-europeo-droni-2022>
6. Sito ufficiale DJI, <https://www.dji.com/it/company?site=brandsite&from=footer> (Consultato 15/02/2023)
7. DJI Phantom 4 PRO V2.0, <https://www.dji.com/it/phantom-4-pro-v2>
8. DJI Mini 3 PRO, <https://www.dji.com/it/mini-3-pro>
9. DJI Mavic air 2, <https://www.dji.com/it/mavic-air-2>
10. DJI Mavic 2 Enterprise Advanced, <https://www.dji.com/it/mavic-2-enterprise-advanced>
11. Multinnov, <https://multinnov.com/>
12. Multinnov Stereo 2, <https://multinnov.com/stereo2/>
13. AerialSolution, <https://www.aerialsolutions.be/en/product/multinnov-stereo-2/>
14. Flyability, <https://www.flyability.com/it/>
15. Flyability Elios 2, <https://www.flyability.com/elios-2>
16. Flyability Elios 3, <https://www.flyability.com/it/elios-3>
17. Nvidia, <https://www.nvidia.com/it-it/>
18. Codice IP, <https://www.giardiniblog.it/certificazione-ip/>
19. Sick Sensor Intelligence, <https://www.sick.com/it/it/sensori-di-distanza/sensori-ad-ultrasuoni/um18/c/g185679>



20. Telemetro laser, <https://www.centroedile.com/misuratori-laser-come-funzionano-e-quali-scegliere/>
21. Termocamere, <https://termocamerafacile.com/cose-una-termocamera/>
22. Zenmuse H20N, <https://www.dji.com/it/zenmuse-h20n>
23. Sensori LiDAR, [https://it.farnell.com/introduction-to-lidar-technology?ICID=I-CT-TECH-RES-CLA-SEP\\_21-TC-000022#:~:text=Il%20LiDAR%2C%20noto%20anche%20come,intervalli%20o%20distanze%20dagli%20oggetti.](https://it.farnell.com/introduction-to-lidar-technology?ICID=I-CT-TECH-RES-CLA-SEP_21-TC-000022#:~:text=Il%20LiDAR%2C%20noto%20anche%20come,intervalli%20o%20distanze%20dagli%20oggetti.)
24. Satellite ICESat della NASA, <https://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/>
25. La NASA, <https://www.nasa.gov/>
26. Effetto Doppler, [https://www.castfvg.it/articoli/fisica/effetto\\_doppler.pdf](https://www.castfvg.it/articoli/fisica/effetto_doppler.pdf)
27. Volvo EX90: il nuovo livello di sicurezza, <https://www.volvocars-partner.ch/blog/it/2022/12/05/volvo-ex90-il-nuovo-livello-di-sicurezza/>
28. Zenmuse L1, <https://www.dji.com/it/zenmuse-l1>
29. Ouster, <https://ouster.com/>
30. Ouster OS0, <https://ouster.com/products/scanning-lidar/os0-sensor/>
31. Skygauge Robotics, <https://www.skygauge.co/>
32. Skygauge product, <https://www.skygauge.co/the-skygauge>
33. Olympus 38DL PLUS, <https://www.olympus-ims.com/it/38dl-plus/>
34. Nixiedip, <https://www.nixiedip.com/>
35. Nero Poli, <https://nerosampler.com/products/nero-poli-water-sampler>
36. Aurora Flight Sciences, <https://www.aurora.aero/>
37. Boeing, <https://www.boeing.com/>
38. Aurora Odyssey, <https://www.hdmotori.it/2018/11/16/odyssey-aurora-boeing-drone-energia-solare/>
39. Emesent, <https://www.emesent.com/company/>
40. HOVERMAP ST-X, <https://www.emesent.com/hovermap-st-x/>
41. Ispezioni minerarie con droni, <https://www.dji-store.it/esplorare-le-miniere-con-droni-autonomi/>
42. Utilizzo di droni per operazioni SAR, <https://www.eliteconsulting.it/utilizzo-di-un-drone-di-ricerca-e-salvataggio/>
43. Soluzioni per droni in situazioni di emergenza, <https://www.aermatica.com/ricerca-e-soccorso-con-droni/>

44. Drone per soccorso e ricerca dispersi in valanga, <https://www.dronezine.it/13040/drone-per-soccorso-e-ricerca-dispersi-in-valanga/>
45. RDN sperimenta i droni per la ricerca e soccorso su macerie, <https://www.quadricottero.com/2019/04/rdn-sperimenta-i-droni-per-la-ricerca-e.html>
46. RTK, <http://it.gnscomponent.com/news/what-is-an-rtk-what-is-the-difference-between-26066977.html>
47. DR2000 FLYING LAB, <https://scentroid.com/products/analyzers/dr2000-flying-lab/>