

# ATTI DEL 2° CONVEGNO DRONI

**INAIL**

Ispezioni con Sistemi a Pilotaggio Remoto:  
Innovazione, Regolamenti e Applicazioni  
nel Controllo Non Distruttivo

**2026**



COLLANA **SALUTE E SICUREZZA**



# ATTI DEL 2° CONVEGNO DRONI

**INAIL**

Ispezioni con Sistemi a Pilotaggio Remoto:  
Innovazione, Regolamenti e Applicazioni  
nel Controllo Non Distruttivo

**2026**

## **Pubblicazione realizzata da**

### **Inail**

Inail - Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti ed insediamenti antropici (Dit)

### **Curato da**

Giuseppe Augugliaro<sup>1</sup>, Silvano Vergura<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Inail, Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti ed insediamenti antropici

<sup>2</sup> Politecnico di Bari

Presidente Commissione Droni di AIPnD

Per informazioni

Inail – Dipartimento innovazioni tecnologiche  
e sicurezza degli impianti prodotti ed insediamenti antropici

Via Roberto Ferruzzi, 38/40 - 00143 Roma (RM)

dit@inail.it

**www.inail.it**

© **2026 Inail**

ISBN 978-88-7484-991-8

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nella pubblicazione, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.

Le pubblicazioni vengono distribuite gratuitamente e ne è quindi vietata la vendita nonché la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

Tipolitografia Inail - Milano, aprile 2026

## PRESENTAZIONE

### **2° convegno droni - Ispezioni con Sistemi a Pilotaggio Remoto: Innovazione, Regolamenti e Applicazioni nel Controllo Non Distruttivo**

Il convegno organizzato in collaborazione tra Inail e AIPND, svolto presso la sede centrale Inail, ha rappresentato un momento di confronto e innovazione sul tema dei Controlli non Distruttivi (CND) tramite droni, con particolare attenzione alla sicurezza degli operatori e alla qualità dei controlli. L'evento ha messo in evidenza come i sistemi a pilotaggio remoto (UAV) stiano rivoluzionando le modalità di ispezione in ambiti complessi, riducendo i rischi per il personale e migliorando l'efficienza delle operazioni.

Sono state affrontate diverse tematiche, dai CND in ambito civile a quelli in ambito chimico-industriale, dai CND sui beni culturali a quelli in ambito energetico.

Uno dei punti centrali emersi è il contributo dei droni alla riduzione dell'esposizione degli operatori a situazioni pericolose, come spazi confinati, ambienti contaminati o lavori in quota. Le ispezioni con sistemi a pilotaggio remoto consentono infatti di minimizzare i rischi legati all'accesso diretto in aree critiche, garantire controlli più rapidi e documentati, grazie a immagini e video ad alta risoluzione e di integrare tecnologie avanzate (IA, sensori termografici, sistemi robotizzati) per analisi non distruttive e predittive.

Durante il convegno è stata presentata una procedura operativa redatta dall'Inail, per l'esame visivo di superfici esterne, ed è stata sottolineata la necessità di formazione specifica e certificazioni per gli operatori, oltre alla definizione di protocolli chiari per l'uso dell'Intelligenza Artificiale, che deve supportare il tecnico senza sostituirlo.

La seconda giornata ha introdotto un format innovativo basato su cinque tavoli tematici, che hanno favorito il confronto diretto tra esperti e operatori, sui seguenti temi:

- Normativa, certificazioni ed etica
- Intelligenza Artificiale per i CND
- Ispezioni in ambienti aperti e confinati
- Ispezioni a contatto
- Attività di ricerca e sistemi UAV Inail

Le sintesi dei tavoli tematici hanno confermato l'urgenza di sviluppare standard condivisi, nuove figure professionali e soluzioni integrate per garantire sicurezza, qualità e sostenibilità nell'uso dei droni.

Corrado Delle Site  
Direttore del Dipartimento Innovazioni  
tecnologiche e sicurezza degli impianti,  
prodotti e insediamenti antropici



## INDICE

<b>PROCEDURA PER L'ESECUZIONE DI ESAME VISIVO DI SUPERFICI ESTERNE DI ATTREZZATURE TRAMITE DRONE</b>	<b>7</b>
<b>ESAME VISIVO DELLA SUPERFICIE INTERNA DI ATTREZZATURE E IMPIANTI: ESEMPI PRATICI</b>	<b>17</b>
<b>ISPEZIONI A CONTATTO CON DRONE SU LINEE ELETTRICHE AD ALTA TENSIONE: RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE CON ALCUNI OPERATORI EUROPEI</b>	<b>21</b>
<b>CONTROLLI NON DISTRUTTIVI IN SPAZI CONFINATI</b>	<b>31</b>
<b>DALL'INNOVAZIONE ALLA REGOLAMENTAZIONE EUROPEA: IL PERCORSO DEGLI STANDARDS ARMONIZZATI ALLA NORMATIVA DEI DRONI PER L'INDUSTRIA</b>	<b>39</b>
<b>ISPEZIONI TERMOGRAFICHE CON DRONE DI IMPIANTI FOTOVOLTAICI: OBIETTIVI E COMPETENZE.</b>	<b>45</b>
<b>DRONI PER LA SICUREZZA: LA RICERCA INAIL PER LA GESTIONE "SICURA" DEI DISASTRI NATECH NEGLI IMPIANTI INDUSTRIALI PIR</b>	<b>57</b>
<b>IMPLEMENTAZIONE DELLA SALUTE E SICUREZZA SUL LAVORO IN SITI CONTAMINATI, INDUSTRIALI E IN AMBITO AGRICOLO PER MEZZO DI DRONI</b>	<b>67</b>



## PROCEDURA PER L'ESECUZIONE DI ESAME VISIVO DI SUPERFICI ESTERNE DI ATTREZZATURE TRAMITE DRONE

F. Giacobbe, R. Balistreri, G. Augugliaro, E. Artenio - INAIL

### ABSTRACT

In questo lavoro viene presentata una procedura per l'esecuzione dell'esame visivo di superfici esterne tramite l'utilizzo di UAS (Unmanned Aerial System), meglio noto come drone.

Nella presente memoria oltre alla struttura e ai contenuti della procedura, vengono presentati anche i numerosi vantaggi derivanti dall'uso dei droni per l'esecuzione dell'esame visivo, non solo per quanto riguarda l'aspetto della sicurezza, ma anche in termini di uniformità, confronto e robustezza dei risultati [1], [2], [3], [4]. Gli argomenti di cui sopra sono ulteriormente avvalorati dalla presentazione di due casi studio, sviluppati applicando tale metodica, nel caso di attrezzature di lavoro.

### 1. Introduzione

L'esame visivo è un metodo di ispezione, codificato come controllo non distruttivo (CND), che permette di effettuare la valutazione dell'eventuale stato di degrado superficiale di attrezzature ed impianti. Nei casi di strutture, caratterizzate da uno sviluppo in altezza, sorge dunque l'esigenza di utilizzare ponteggi o strutture aeree sollevabili, per poter accedere in sicurezza agli elementi oggetto di ispezione. L'uso degli Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), noti anche come droni, permette di ottenere ad oggi rilevanti risultati. Si ottimizzano infatti i tempi, i costi e le condizioni di sicurezza senza condizionare il livello qualitativo dell'ispezione [5], [6], [7].

L'indagine permette di gestire in modo efficace e veloce una propedeutica analisi, individuando le superfici e i particolari che necessitano di successivi puntuali e specifici ulteriori controlli, rilevando e valutando condizioni di degrado (ad esempio lo stato di efficienza della verniciatura di protezione, eventuale presenza e localizzazione di processi di corrosione generalizzata o cedimenti/distacchi/perdite negli accoppiamenti, ecc.).

Tenendo conto delle grandi potenzialità degli UAVs, emerge la necessità di colmare un vuoto metodologico con la definizione di una procedura che indichi le modalità di conduzione delle attività ispettive.

L'uso degli UAVs per le indagini e le ispezioni hanno assunto livelli di elevata significatività, estendendo l'applicazione a molteplici contesti industriali.

Di seguito sono riportati i punti di forza e di debolezza relativi all'utilizzo degli UAS per le attività di monitoraggio e ispezione.

I punti di forza relativi all'utilizzo degli UAS per le attività di monitoraggio e ispezione sono:

- Ridotte dimensioni dei velivoli con conseguente facilità di trasporto;
- Riduzione di tempi e costi ed un miglioramento delle condizioni di sicurezza;
- Flessibilità e riproducibilità delle operazioni;
- Contatto diretto con il componente in esame non richiesto;

- Buona risoluzione dei dati;
- Nessuna infrastruttura necessaria per le operazioni;
- Conduzione delle attività con impianti e strutture in marcia;

I punti di debolezza sono, invece:

- Risultati non soddisfacenti in caso di condizioni meteo avverse o in presenza di limitata o eccessiva luminosità;
- Limitazione del peso e delle dimensioni del carico (ad esempio videocamera, ecc.);
- Possibilità di sovratemperatura del motore sotto eccessivo e prolungato sforzo;
- Durata della batteria limitata.

## **2. Procedura operativa**

L'obiettivo degli autori della presente memoria è di presentare una procedura avente la finalità di fornire indicazioni operative utili per l'esecuzione dell'esame visivo delle superfici esterne di attrezzature, componenti e impianti outdoor per valutarne lo stato di conservazione, con l'ausilio di un UAS.

Le figure professionali coinvolte nelle attività ispettive sono diverse, ciascuna con mansioni, competenze e responsabilità ben definite. Nella procedura sono individuate le seguenti quattro figure:

- Gestore attrezzatura da ispezionare o impianto (colui che è addetto al governo dell'attrezzatura e ha conoscenze storiche del sito)
- Committente: colui che richiede l'ispezione e definisce gli obiettivi della stessa
- Addetto ispezione: figura addetta all'esecuzione dell'ispezione visiva
- Pilota remoto / operatore

Queste figure dovranno condividere e concordare gli obiettivi dell'attività di ispezione e le condizioni impiantistiche che concorrano ad una ottimale riuscita dell'ispezione. Tra queste figure, si distinguono gli addetti al pilotaggio del drone UAV, ovvero i piloti, e il personale qualificato per le valutazioni dell'esame visivo. Talvolta queste figure possono essere ricoperte dalla stessa persona.

Il personale addetto al pilotaggio dell'UAV ha la responsabilità di:

- pilotare l'aeromobile impiegato per effettuare l'esame visivo;
- Analizzare, in fase di prevolo, l'apparecchiatura da ispezionare avendo cura di studiare il disegno costruttivo e verificare che il volo del drone sia effettuato in sicurezza, in rispetto alle prescrizioni ENAC/EASA;
- eseguire le manovre secondo le indicazioni ricevute dal personale addetto all'esecuzione dell'esame visivo, in rispetto alle prescrizioni ENAC/EASA.

Il personale addetto alla valutazione dell'esame visivo deve possedere requisiti conformi a quanto richiesto dalle disposizioni di legge, norme, standard di prodotto, regole tecniche, codici o specifiche tecniche applicabili al contesto applicativo.

Inoltre, tale personale deve:

- essere dotato di una idonea capacità visiva (rif. UNI EN ISO 9712) [8];

- essere qualificato allo scopo (rif. UNI EN ISO 9712);
- essere a conoscenza delle procedure di fabbricazione utilizzate, nonché della funzione e delle condizioni operative dell'attrezzatura a pressione;
- disporre le indicazioni al personale addetto al pilotaggio dell'UAS;
- analizzare i dati acquisiti dal UAS;
- effettuare una valutazione oggettiva delle caratteristiche e/o anomalie in base a specifici parametri;
- verbalizzare l'esito dell'esame eseguito (da spostare nel paragrafo sulle attività da svolgere).

Operativamente è prevista una fase preliminare dove si individuano le figure professionali coinvolte nel processo di ispezione che dovranno concordare gli obiettivi dell'attività di ispezione, le condizioni impiantistiche che concorrano ad una ottimale riuscita dell'ispezione, o che possano limitarla o condizionarla. Inoltre, è imprescindibile, per la scelta appropriata dell'UAS e del sistema di cattura di immagini e video, l'esame delle specifiche tecniche dell'attrezzatura, ovvero dei disegni generali e di dettaglio, elementi e componenti, vista planimetrica, della eventuale presenza di infrastrutture e ostacoli nelle adiacenze.

Si dovrà tener conto delle necessarie autorizzazioni previste a cura degli enti preposti e si dovranno esaminare le ulteriori informazioni utili, quali ad esempio rapporti di precedenti esami visivi o di altri controlli non distruttivi.

Un fondamentale aspetto per un'efficace gestione della sicurezza del processo ispettivo riguarda l'individuazione e la valutazione dei rischi. Nello specifico, nel corso delle operazioni di volo possono manifestarsi condizioni di pericolo che devono essere opportunamente determinate al fine di effettuare un'attenta e dedicata valutazione del rischio a tutela del personale coinvolto presente nell'area interessata. Si precisa che è propedeutico e significativo il rispetto delle indicazioni e prescrizioni presenti nel libretto d'uso dell'UAV, nonché delle regolamentazioni vigenti (es. ENAC, ecc.) per singolo caso.

A carattere puramente indicativo si elencano alcune possibili condizioni di pericolo correlate al volo dell'UAV:

- impatto con ostacoli con proiezione incontrollata di materiale;
- collisione con elementi critici (es. cavi elettrici, vetrate, materiale infiammabile o tossico, ecc.);
- collisione con il personale presente nel sito;
- proiezione di polveri e corpuscoli.

Prima delle operazioni di volo è raccomandato effettuare in forma propedeutica l'analisi in situ per l'individuazione delle aree di decollo e atterraggio, l'individuazione di eventuali altre possibili condizioni di pericolo che possano inficiare il volo ispettivo (ad esempio: ostacoli fissi che possano limitare il contatto visivo diretto operatore-UAS), la definizione delle aree dove possano eventualmente sostare ulteriori persone non direttamente coinvolte nell'attività ispettiva. In questa fase, si esaminano inoltre

le informazioni meteo aggiornate e le eventuali interferenze con le attività lavorative presenti nelle adiacenze dell'area di ispezione opportunamente delimitata, nonché la verifica dello stato di ricarica delle batterie, efficienza dei comandi in remoto e della qualità del segnale satellitare, qualora si voli in modalità GPS. Viene altresì effettuato un test di acquisizione di video ed immagini.

Durante il volo il pilota esegue:

- il monitoraggio continuo dell'autonomia residua di volo per garantire in sicurezza il ritorno del UAV;
- il monitoraggio dei parametri UAV (funzionalità drone);
- la predisposizione di un atterraggio "di emergenza", verificare lo stato funzionale del UAS ed eventualmente interrompere la missione;
- Il monitoraggio continuo dell'evoluzione delle condizioni meteo.

Concluse le attività, tenuto conto dell'autonomia della batteria, si procede con uno stazionamento a 1m da terra (hovering) con finalità di verifica del comportamento del UAS all'atterraggio.

Acquisite le informazioni nella forma di immagini e video il personale qualificato CND procederà alle valutazioni di merito che possono essere sintetizzate:

- Non sono rivelate indicazioni.
- Indicazioni che non richiedono interventi. L'indicazione è assolutamente irrilevante ai fini della valutazione del rischio o ha caratteristiche tali da non evolvere, presumibilmente, verso condizioni di rischio significativo fino alla successiva ispezione programmata.
- Indicazioni che non richiedono interventi nell'immediato. L'indicazione può evolvere verso condizioni di rischio non trascurabili che non richiedono, comunque, interventi nell'immediato. È tuttavia obbligatorio il monitoraggio svolgendo specifiche Ispezioni straordinarie anche eseguendo ulteriori controlli o particolari accertamenti con altri metodi PND.
- Indicazioni che richiedono interventi nell'immediato. L'indicazione (difetto) può evolvere verso condizioni di rischio non trascurabili che richiedono interventi nell'immediato. È obbligatorio eseguire ulteriori controlli ed accertamenti con altri metodi PND. Può rendersi necessario la messa fuori servizio dell'attrezzatura, del componente o elemento.

Il processo di ispezione può essere diviso in macro-fasi come rappresentato in figura 1.

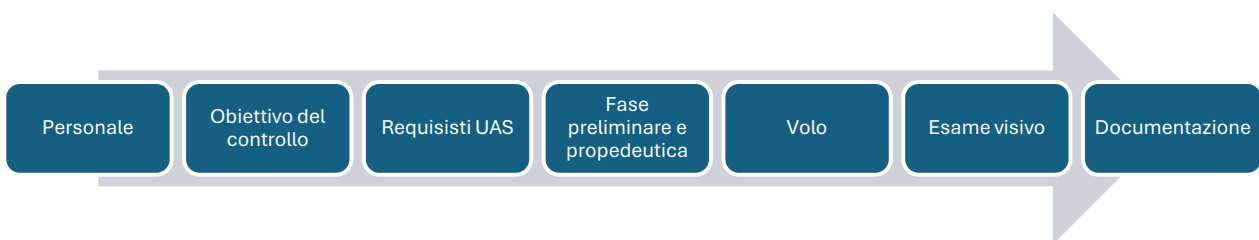


Figura 1 - Macro-fasi dell'esame visivo con UAS

### 3. Target

In procedura, per permettere l'individuazione della minima indicazione rilevabile è stato messo a punto un TARGET, secondo UNI EN ISO 9712 e UNI EN 13927. Il target, riportato in figura 2, dovrà essere posizionato nelle stesse condizioni di illuminazione della superficie da verificare, per avere un risultato significativo.

All'interno del target sono stati utilizzati i seguenti indicatori:

- pannello dei colori con i numeri di Ishihara;
- pannello delle linee USAF 1951;
- scala dei grigi;

Con riferimento al Target USAF 1951, si potranno effettuare diverse misure a diverse distanze, per simulare la posizione dell'UAV durante l'esame [9].

Nella procedura vengono riportati, a titolo esemplificativo, due differenti target USAF 1951, di 5 cm e 15 cm di lato rispettivamente, e sono stati scelti i seguenti elementi da individuare, per essere coerenti con la minima indicazione da rilevare:

- Inquadrando il target USAF con il lato di 15 cm:
  - da circa 30 cm di distanza deve essere visibile il gruppo -1, elemento 2
  - da circa 80 cm di distanza deve essere visibile il gruppo -2, elemento 6

La scelta della minima coppia gruppo-elemento da individuare e della distanza del drone dal target dipendono dalla indicazione minima da rilevare e dalle caratteristiche del drone utilizzato per l'esame visivo.

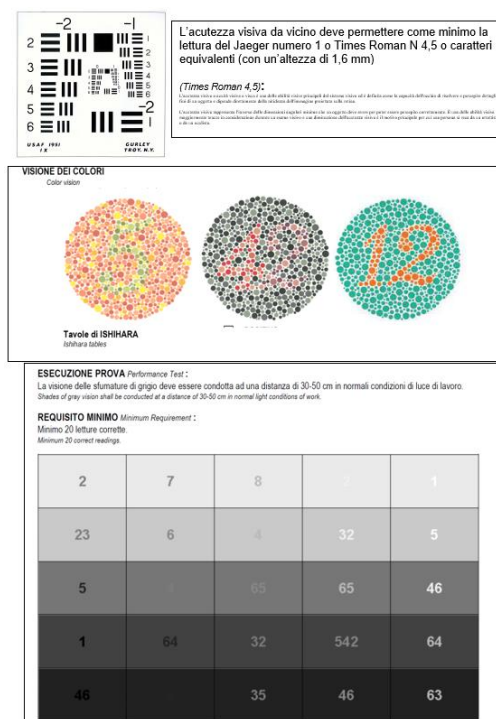


Figura 2 – Target

#### 4. Casi studio

Nella presente memoria vengono riportate le considerazioni conseguenti all'esame visivo di una gru a torre installata in un cantiere edile e della superficie esterna di un serbatoio.

##### 4.1 Esame visivo di una gru a torre

La prima applicazione della procedura è stata effettuata ispezionando un'apparecchiatura di sollevamento, ovvero una gru a torre girevole con rotazione in alto anno di fabbricazione 2006. La gru a torre è di tipo automontante con torre telescopica, progettata secondo la norma tecnica DIN 15018 con classe di sollevamento H1 e Gruppo di sollecitazione B3. Lo studio riguarda la ralla girevole di rotazione, dove risultano fulcrati il braccio e la controfreccia, posta ad una quota di 17,5 m rispetto al suolo. La sperimentazione mira ad evidenziare l'effettivo stato delle protezioni superficiali di verniciatura tramite visione delle immagini catturate da un drone dotato di videocamera 4K. Nella tabella seguente si riportano le immagini registrate a tre diverse distanze di ripresa ovvero 10 m, 5 m e 2 m. Si evidenzia che anche ad una distanza di 10 m è possibile rilevare con un dettaglio apprezzabile, eseguendo un ingrandimento digitale compreso tra il 150% ed il 300%, le diverse zone che presentano alcune parti soggette ad un degrado della verniciatura superficiale che ha il compito di proteggere la struttura metallica da fenomeni di corrosione. Le immagini riprese ad una distanza di 2 m permettono un'analisi più dettagliata consentendo il rilievo di anomalie dell'ordine di grandezza di 5 mm.

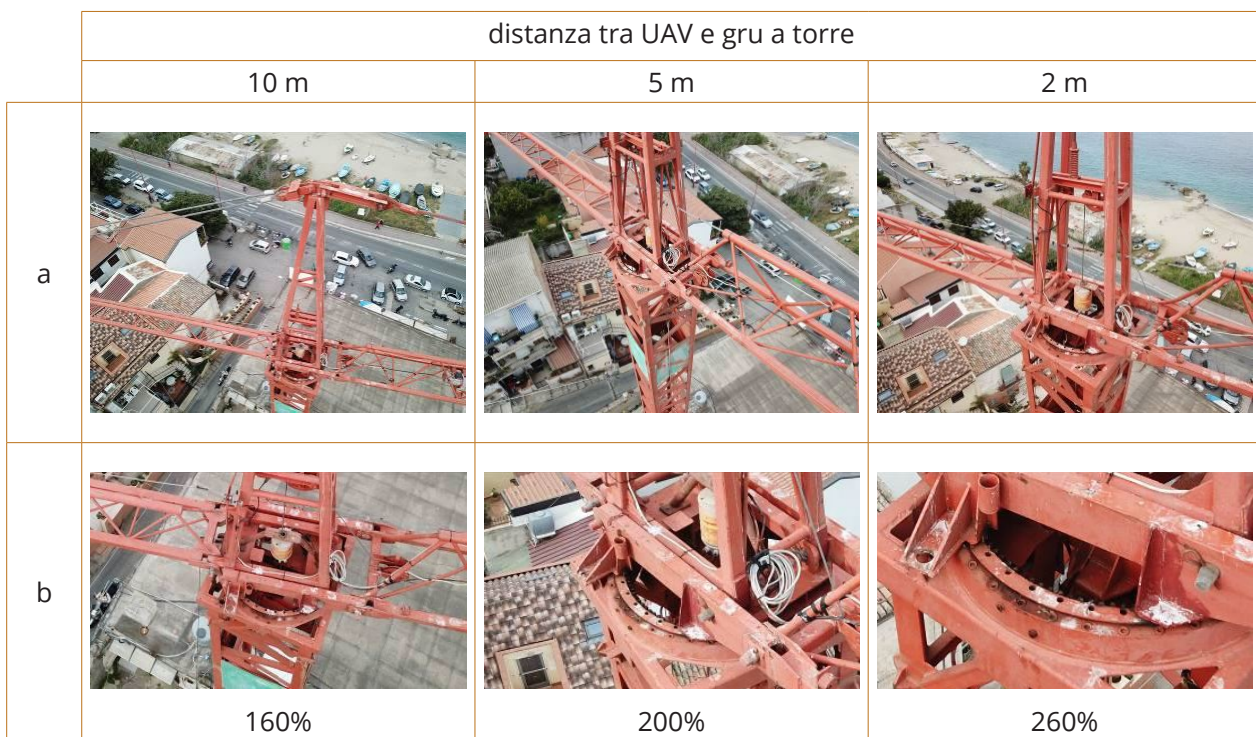


Fig. 3 – particolare della verniciatura di protezione della struttura metallica  
 a) immagine digitale con focale fissa 26 mm e risoluzione 3000x4000;  
 b) crop da ingrandimento

La sperimentazione ha evidenziato altresì l'opportunità di ispezionare parti dell'attrezzatura che non risultano essere visibili a quota zero e pertanto non visionabili anche con strumenti ottici di ingrandimento [10].

L'operatore qualificato e certificato di II livello metodo VT secondo la norma UNI EN ISO 9712, dopo aver visionato le immagini ha espresso il seguente giudizio: "Indicazioni che non richiedono interventi". L'operatore ha poi specificato che la verniciatura di protezione è presente sulla quasi totalità della superficie ad esclusione di un'area circoscritta di forma allungata (dimensione 3 cm x 20 cm) in corrispondenza dei dadi di serraggio in direzione N-E. L'indicazione ha caratteristiche tali da non evolvere, presumibilmente, verso condizioni di rischio significativo fino alla successiva ispezione programmata prevista tra 12 mesi.

#### **4.2 Esame visivo del tetto di un serbatoio**

L'ispezione del tetto è stata eseguita con volo in modalità VLOS (cioè con l'APR sempre in contatto visivo con il pilota) sfruttando dei terrapieni limitrofi al bacino in cui si operava. Durante il primo volo di ricognizione sono state scattate foto di tutta la superficie del tetto, cercando di suddividerla in 8 spicchi corrispondenti ai punti cardinali di riferimento e in particolar modo è stata fatta più attenzione sulla zona delle valvole di sfogo, che dalle ispezioni precedenti sui serbatoi risultava quella più compromessa.



Figura 4 – foto del tetto del serbatoio

Sono state individuate alcune criticità:

- nel tratto rettilineo sottostante la linea antincendio, si nota la formazione di gravi sfogliature della vernice con stratificazioni di ossido e gravi corrosioni.
- Zona adiacente al corrimano centrale (3<sup>a</sup> lamiera) in corrispondenza del primo ugello e della 1° e 3° staffa di supporto antincendio, si riscontrano sfogliature della vernice con presenza di stratificazioni di ossido e formazioni di corrosioni isolate.
- in prossimità di un accoppiamento flangiato del sistema antincendio si riscontrano sfogliature della vernice con presenza di stratificazioni di ossido e formazioni di corrosioni isolate.

Ovviamente ogni criticità è accompagnata da foto specifiche per una corretta archiviazione della documentazione e per una più precisa identificazione della zona interessata.

L'operatore qualificato e certificato di II livello metodo VT secondo la norma UNI EN ISO 9712, visionate le immagini ha espresso il seguente giudizio per le criticità evidenziate: "Indicazioni che richiedono interventi nell'immediato". Sono quindi stati effettuati interventi per ripristinare le parti del serbatoio e della vernice danneggiate.

## **5. Conclusioni**

L'uso dei droni, per le relative potenzialità, è ormai considerato come valido strumento di supporto per le ispezioni, al fine di migliorare la qualità dell'indagine in quanto permette di ottenere informazioni e dettagli che non possono essere determinati facilmente senza metodi di accesso costosi e talvolta con la necessaria interruzione del servizio. Questa tecnologia può aiutare gli operatori addetti alle valutazioni dello stato di conservazione ed efficienza di attrezzature e nella pianificazione di eventuali interventi futuri per indagini di dettaglio.

In questo lavoro abbiamo presentato una procedura operativa per la conduzione dell'esame visivo indiretto che analizza i singoli processi e le singole fasi in successione temporale, per ottenere risultati soddisfacenti nel caso di impiego di UAS per la conduzione dell'ispezione.

Le ispezioni condotte utilizzando tale tecnologia hanno degli indubbi ed evidenti vantaggi rispetto alla metodica tradizionale: dalla possibilità di poter utilizzare rapidamente questi dispositivi, alla flessibilità di manovra e di accessibilità in quota, dalla valida della qualità delle immagini alla possibilità di ridurre al minimo i costi legati alle operazioni ma, ancor più importante per il nostro Istituto, la grande mitigazione dei rischi operativi.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Nooralishahi, Parham, et al., *Drone-based non-destructive inspection of industrial sites: A review and case studies*, Drones 5.4, 2021.
- [2] Falorca, Furtado, et al., *New trends in visual inspection of buildings and structures: Study for the use of drones*, Open Engineering 11.1, 2021.
- [3] Jacobo D., Toledo G., et al., *Evaluation of drones for inspection and control in industry 4.0*, Technological and Industrial Applications Associated with Intelligent Logistics, 579-595, 2021.
- [4] Yasuda Y. D., Cappabianco F. A., et al., *Aircraft visual inspection: A systematic literature review*. Computers in Industry, 141, 2022.
- [5] Hütten N., Meyes R., Meisen T., *Vision Transformer in Industrial Visual Inspection*, Applied Sciences, 12(23), 2022.
- [6] Shihavuddin A., et al., *Wind turbine surface damage detection by deep learning aided drone inspection analysis*, Energies 12.4, 2019.
- [7] F. Giacobbe, E. Biancuzzo, *Inspection of Components with the Support of the Drones*, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), ISSN 2395-0072, vol. 05, issue 12, december 2018.
- [8] G. Asaro, G. Augugliaro, E. Artenio, R. Balistreri, F. Giacobbe, O. Zirilli, A. Berton, T. Mullano, A. Gabbia, *Procedura per la conduzione dell'esame di strutture sviluppate in altezza con l'uso di Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)*, La Metallurgia Italiana - International Journal of the Italian Association for Metallurgy - n. 01 gennaio 2024 pagg 10-15
- [9] MIL-STD-150A, Military standard: photographic lenses, 1959.
- [10] Hallermann N., Morgenthal G., *Visual inspection strategies for large bridges using Unmanned Aerial Vehicles (UAV)*, In proceeding of 7th IABMAS, International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (pp. 661-667), July 2014.
- [11] F. Giacobbe, M. Platania, M. Giuffrida, D. Grillo, R. Di Rosa, C. Mennuti, A. Corso, M. Sebbio, *Ispezione ed esame visivo delle attrezzature di sollevamento con l'uso di Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)*, atti Giornate Nazionali sulla Corrosione, ISBN 978-88-98990-20-7, 2019.



## ESAME VISIVO DELLA SUPERFICIE INTERNA DI ATTREZZATURE E IMPIANTI: ESEMPI PRATICI

Thomas Mullano – Bureau Veritas Nexta

*Key-words:* Ispezione, monitoraggio, esame visivo, integrità, sistemi aerei a pilotaggio remoto (UAS), Unmanned Aerial Vehicles (UAVs).

### 1. Introduzione

L'Esame Visivo (EV) condotto con l'ausilio di sistemi aerei a pilotaggio remoto (UAS) è una tecnica di controllo non distruttivo (CND) che sta guadagnando crescente attenzione nel settore delle ispezioni industriali. Questa metodologia, che si basa sull'acquisizione di immagini e video ad alta risoluzione, consente di esaminare in dettaglio le superfici di impianti e attrezzature senza dover intervenire fisicamente sugli stessi. Grazie all'impiego dei droni (chiamati anche UAV, ovvero Unmanned Aerial Vehicles), è possibile condurre ispezioni in modo più sicuro, efficiente e rapido, riducendo i rischi per gli operatori e migliorando l'affidabilità delle analisi.

In particolare, l'utilizzo di droni nelle ispezioni è molto vantaggioso per le aree confinate o ad alto rischio, dove l'accesso diretto potrebbe essere problematico o pericoloso. I droni, infatti, permettono di raccogliere dati da distanza, senza la necessità di entrare fisicamente negli spazi difficilmente accessibili. Questa tecnologia, che continua ad evolversi, trova applicazione in vari settori, come oil & gas, energia, infrastrutture e costruzioni, dove la sicurezza e l'efficienza operativa sono fondamentali.

Inoltre l'implementazione dell'intelligenza artificiale nei droni da ispezione sta trasformando radicalmente l'intero processo di valutazione e gestione delle infrastrutture, offrendo vantaggi concreti in termini di rapidità, efficienza e costi.

L'obiettivo di questo elaborato è esaminare alcuni esempi pratici di esame visivo di superfici interne utilizzando i droni, mettendo in evidenza le applicazioni, le opportunità e le sfide legate all'uso degli UAV in ambito industriale.

### 2. Work-flow di un esame visivo di superfici interne

Un esame visivo condotto in ambienti interni richiede il coinvolgimento di diverse figure professionali, ognuna con proprie mansioni, competenze e responsabilità: gli addetti al pilotaggio del drone UAV, ovvero i piloti, e il personale qualificato per le valutazioni dell'esame visivo.

In alcuni casi, queste funzioni possono essere svolte dalla stessa persona, ma generalmente richiedono competenze specialistiche distinte. La collaborazione tra pilota e tecnico è fondamentale per il successo dell'ispezione, poiché entrambe le figure devono essere in grado di lavorare in sinergia.

Il personale addetto al pilotaggio dell'UAV ha la responsabilità di pilotare l'aeromobile e di analizzare, in fase di prevolo, l'apparecchiatura da ispezionare avendo cura di studiare il disegno costruttivo e verificare che il volo del drone sia effettuato in sicurezza. Operativamente, in una fase preliminare al volo, si concordano gli obiettivi dell'attività di ispezione e si individuano gli elementi da ispezionare per una ottimale riuscita

dell'ispezione. La pianificazione di missioni indoor richiede pertanto un'attenta analisi preventiva dei rischi presenti nell'area delle operazioni e talvolta, uno o più voli preventivi di verifica per individuare protuberanze o piccoli ostacoli che potrebbero penetrare nelle fessure della gabbia e impattare con le eliche.

Durante la fase di volo, alcuni fattori rilevanti da tenere in considerazione all'interno di spazi ridotti sono la presenza di turbolenze e di polveri causate dallo spostamento d'aria del drone. Infatti le missioni indoor in spazi confinati richiedono abilità di pilotaggio avanzate.

Il drone impiegato nelle ispezioni indoor è progettato in modo tale da non riportare danni strutturali conseguenti a urto con eventuali ostacoli, e nel caso in cui occorra avvicinarsi a superfici per catturare immagini di dettaglio, possa appoggiarsi a queste senza conseguenze.

Prima di eseguire l'ispezione, è necessario raccogliere tutta la documentazione tecnica relativa all'attrezzatura da ispezionare, oltre a ottenere i permessi necessari. Gli operatori devono essere muniti di DPI (Dispositivi di Protezione Individuale), in particolare quando si operano in ambienti industriali o pericolosi. Talvolta, un sopralluogo fisico preliminare è utile per valutare meglio la configurazione degli spazi e comprendere i rischi che potrebbero presentarsi durante l'ispezione.

### ***3. Volo e analisi delle performance: esempio pratico di ispezione di un serbatoio a pressione atmosferica***

Un caso pratico di esame visivo con UAV riguarda l'ispezione di un serbatoio a pressione atmosferica, dove il principale obiettivo è rilevare eventuali criticità strutturali che potrebbero compromettere l'integrità delle lamiere del tetto e dei componenti di supporto (Fig.1). Prima dell'avvio dell'ispezione, il pilota acquisisce la documentazione tecnica relativa al serbatoio, in particolare quella che riguarda la struttura del tetto e le giunzioni tra le travi di supporto e le staffe. Il pilota, insieme al personale tecnico, definisce la strategia di volo, individuando le aree più critiche da esaminare.



Fig. 1 Esempio di UAV Impiegato per ispezioni di superfici interne.



Fig. 2 Immagine della parte centrale del tetto di un serbatoio, acquisita con UAV munito di fotocamera.

Nella prima fase dell'ispezione, il pilota, una volta acquisita la documentazione inerente il serbatoio, su indicazione del personale tecnico di impianto, acquisisce le immagini e i video dei componenti strutturali del tetto, ovvero la parte centrale e le giunzioni tra le travi e le staffe di supporto (Fig.2).

Durante il volo, il pilota esegue delle manovre precise per catturare immagini ad alta risoluzione delle aree strutturali, come le giunzioni tra travi e staffe. Vengono analizzate con attenzione le potenziali zone di usura, ruggine, o deformazioni che potrebbero compromettere la stabilità della struttura (Fig.3).



Fig.3 Dettagli dei punti di contatto tra le staffe di supporto delle travi e le virole del mantello di un serbatoio.

Al termine della fase di volo, i dati acquisiti vengono utilizzati dal personale qualificato al fine di valutare lo stato di integrità dei componenti dell'apparecchiatura ispezionata.

#### 4. Conclusioni

Le attività ispettive eseguite con l'impiego di UAS rappresentano la nuova frontiera tecnologica nell'acquisizione e nell'interpretazione di dati di aree e condizioni difficilmente accessibili con le tecniche tradizionali. L'impiego di UAS per gli esami visivi di superfici in spazi confinati garantiscono maggiore sicurezza degli operatori, maggiore accessibilità e riduzione dei tempi e dei costi dell'ispezione.

#### BIBLIOGRAFIA

- Nooralishahi P., Ibarra-Castanedo C., Deane S et al., "Drone-based non-destructive inspection of industrial sites: A review and case studies, Drones 5(4), 106, 2021
- Falorca, Furtado, et al., "New trends in visual inspection of buildings and structures: Study for the use of drones", Open Engineering 11.1, 2021
- Liang H., Lee S. Bae W., Kim J, Seo S., "Towards UAVs in Construction: Advancements, Challenges, and Future Directions for Monitoring and Inspection", Drones 2023, 7(3), 202, 2023
- Hassanalian M., Abdelkefi A, "Classifications, applications, and design challenges of drones: A review", Prog. Aerosp. Sci., 91, 99-131, 2017



## ISPEZIONI A CONTATTO CON DRONE SU LINEE ELETTRICHE AD ALTA TENSIONE: RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE CON ALCUNI OPERATORI EUROPEI

Simone Panza - ANT-X srl, via Davanzati Bernardo 33, 20158 Milano

### SOMMARIO

Nelle ispezioni NDT a contatto di infrastrutture, un operatore deve portarsi in prossimità del punto da ispezionare ed andare a contatto con esso utilizzando uno strumento di misura per raccogliere dati. Spesso il punto da ispezionare si trova in ambienti che comportano rischi per la sicurezza dell'operatore; inoltre per svolgere l'ispezione è talvolta necessario l'impiego di risorse di disponibilità limitata e/o l'allestimento di strutture di supporto a terra, con i tempi e costi associati.

Recentemente i droni hanno trovato ampio utilizzo nelle ispezioni di infrastrutture per raccogliere informazioni di tipo visivo; tuttavia, i droni attualmente in commercio in generale non sono in grado di svolgere missioni di ispezione a contatto, a causa della loro configurazione convenzionale.

Viene presentata la soluzione ARIES basata su drone per ispezioni NDT a contatto di infrastrutture. In particolare, viene analizzato il caso d'uso dell'ispezione a contatto di isolatori in composito su linee elettriche ad alta tensione.

Vengono dapprima illustrate le caratteristiche delle ispezioni NDT visive e a contatto, evidenziandone le differenze e, con particolare riferimento al caso delle ispezioni con drone, analizzando le caratteristiche della piattaforma drone necessarie per svolgere questo tipo di applicazioni.

Viene presentata l'esperienza ottenuta nell'ambito della sperimentazione della soluzione ARIES con il coinvolgimento di diversi operatori (TSO, Transmission System Operator) europei; viene riportato il feedback degli end user, esponendo i vantaggi ottenuti utilizzando la soluzione proposta rispetto al metodo tradizionale, ed evidenziando i punti che richiedono particolare attenzione per l'ulteriore sviluppo della soluzione proposta.

### 1. Introduzione

Le aziende che si occupano di gestione e manutenzione di infrastrutture (per es. gestori di rete di trasmissione di elettricità ad alta tensione, operatori di turbine eoliche, operatori che si occupano di monitoraggio e ispezione di infrastrutture civili e industriali, ...) spesso hanno la necessità di effettuare ispezioni a contatto con l'infrastruttura: l'operazione viene condotta manualmente da un operatore umano che deve posizionarsi in corrispondenza del punto da ispezionare ed andare a contatto con l'oggetto da ispezionare tramite uno strumento. Questo tipo di ispezione spesso viene condotto in ambienti pericolosi che costituiscono un rischio per la salute dell'operatore (es. in quota, o in presenza di alta tensione), e richiede strumenti come gru o passerelle mobili, o la necessità di montare un'impalcatura,

con i problemi di tempi, costi, e disponibilità di risorse associati. Inoltre, spesso è necessario interrompere parzialmente o totalmente l'operatività dell'asset da ispezionare (es. nel caso di ispezioni su viadotti è necessario fermare il traffico su una o più corsie; nel caso di turbine eoliche è necessario fermare il rotore; ...), con i costi di fermo impianto associati.

La disponibilità di una tecnologia in grado di svolgere la stessa ispezione a contatto con l'utilizzo di un drone eviterebbe la necessità di portare l'operatore in prossimità del punto di ispezione. Questo contribuirebbe in maniera significativa da un lato a migliorare la sicurezza dell'operatore, e dall'altro a migliorare l'efficienza e velocizzare i tempi e costi richiesti per svolgere le ispezioni: tale tecnologia sarebbe quindi la chiave per risolvere il collo di bottiglia legato ai tempi richiesti per l'ispezione, aumentando sensibilmente il throughput in termini di asset ispezionati nell'unità di tempo, e permettendo quindi di aumentare la frequenza delle ispezioni. In ultima analisi, questo permetterebbe di migliorare il processo di monitoraggio e di protezione dell'infrastruttura, programmando tempestivamente interventi di manutenzione in caso di necessità, con conseguenti benefici sulla sicurezza.

I droni attualmente disponibili sul mercato consentono di svolgere ispezioni visive (sostanzialmente, raccogliere foto e video). Questo tipo di macchine permette di svolgere una vasta gamma di missioni in numerosi settori:

- edilizia/infrastrutture;
- utility/oil&gas;
- PA;
- intrattenimento/media;
- ...

Tuttavia, il tipo di missione che si può svolgere con i droni attualmente in commercio è limitato dal fatto che queste macchine permettono il volo libero, ma per loro natura non sono in grado di gestire l'interazione con l'ambiente circostante, a causa della loro configurazione convenzionale con rotori coplanari. La disponibilità di una macchina che possieda la capacità di interagire a contatto con l'ambiente circostante e di compiere operazioni di manipolazione (ovvero che richiedano lo scambio di forze tra l'ambiente e la macchina) aprirebbe il mercato ad una vasta gamma di possibili applicazioni che vadano oltre la classica ispezione visiva: si parla in questo caso di ispezioni NDT (non-destructive-testing). Per potere svolgere questo tipo di missione e gestire l'interazione tra macchina e ambiente, la macchina deve possedere una configurazione di tipo non convenzionale. Alcuni esempi di possibili applicazioni abilitate da una simile tecnologia sono:

- ispezioni di turbine eoliche;
- misure di spessore di strutture metalliche (es. serbatoi);
- ispezioni di linee dell'alta tensione (conduttori, isolatori);
- verifica dello stato di integrità strutturale di viadotti ed infrastrutture in generale;
- ispezioni di pareti di edifici;
- ...

Attualmente il mercato dei droni in grado di svolgere ispezioni a contatto vede la presenza di pochissime imprese pionieristiche che stanno iniziando a proporre i propri prodotti, che sono pensati per specifiche missioni di ispezione a contatto (es. misure di spessore); non esistono al momento soluzioni sul mercato in grado di svolgere ispezioni a contatto di infrastrutture di rete elettrica o viadotti, né piattaforme che possano essere configurate con una ampia varietà di payload.

ANT-X ha recentemente sviluppato un prototipo di drone (ARIES) in configurazione non convenzionale per dimostrare il concetto dell'ispezione a contatto su linee elettriche ad alta tensione; la dimostrazione della soluzione ARIES, avvenuta con successo, apre la strada a molte altre applicazioni di ispezione in diversi settori, accomunate dal requisito di portare uno strumento a contatto con l'infrastruttura da ispezionare. Nel resto del documento viene illustrato quanto segue:

- Come si svolge una procedura di ispezione di isolatori di linea elettrica ad alta tensione secondo il metodo tradizionale;
- Come funziona la soluzione ARIES basata su drone per le ispezioni a contatto;
- L'esperienza raccolta nell'ambito di diverse sperimentazioni della soluzione ARIES con alcuni TSO europei di linee elettriche ad alta tensione.

## **2. Ispezione a contatto di isolatore di linea elettrica ad alta tensione**

Viene di seguito descritta la procedura di ispezione a contatto di isolatori su linee ad alta tensione "as-is", ovvero come viene svolta attualmente secondo lo stato dell'arte. Viene considerato in particolare il caso di isolatori in composito. L'ispezione viene svolta in condizione di "live-line", ovvero con la linea in tensione. In Italia, la rete di trasmissione primaria opera tra 220-380 kV, mentre la rete in Alta Tensione tra 132-150 kV.

Viene utilizzato il sensore Positron Composite Insulator Tester (Figura 1). Il sensore misura il campo elettrico lungo l'isolatore. Il sensore è montato su una slitta che permette lo scorrimento lungo l'isolatore; la slitta è a sua volta montata su un'asta in materiale isolante. Il sensore opera in un range di tensione tra 69 kV e 1000 kV.



Figura 1: Positron Composite Insulator Tester.

L'operatore si porta in prossimità dell'isolatore, che si trova nella parte alta del traliccio tipicamente ad un'altezza compresa tra i 20 e 40 m da terra, con l'ausilio per esempio di un cestello o piattaforma montata su braccio mobile/gru (Figura 2). Viene fatto scorrere il sensore lungo tutta la lunghezza dell'isolatore. La slitta deve rimanere a contatto con l'isolatore per tutta la durata della misura, di conseguenza è necessario che l'operatore eserciti una certa forza per mantenere il contatto.



Figura 2: Operatori su una piattaforma durante un'ispezione di isolatore su linea elettrica in tensione.

Il sensore è collegato via wireless ad un tablet/laptop che in tempo reale riceve le misure raccolte e le mostra ad un operatore a terra su un grafico (Figura 3).

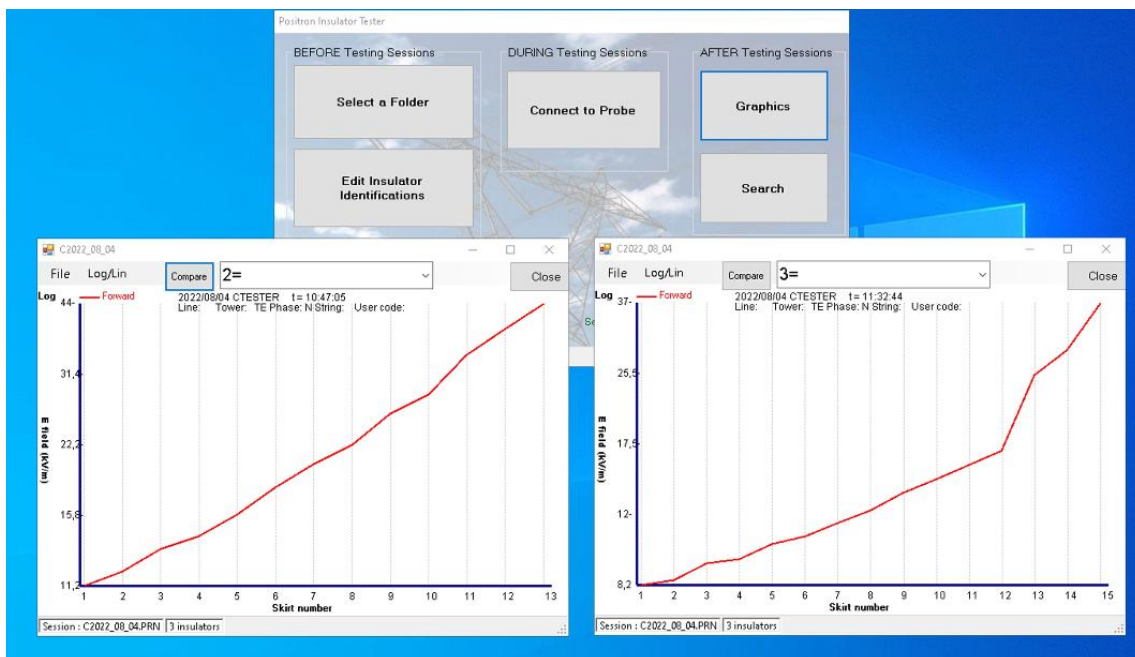


Figura 3: Misura di campo elettrico dal sensore.

### 3. *Descrizione della soluzione ARIES*

In questa sezione viene fornita una descrizione della soluzione ARIES basata su drone per ispezioni a contatto.

La soluzione ARIES è costituita da:

- Drone: una piattaforma drone in configurazione non-convenzionale che permette il volo a contatto stabile con l'ambiente circostante.
- Payload: il sensore/strumento trasportato a bordo drone, da porre a contatto con l'oggetto da ispezionare. Tipicamente lo strumento va portato a sbalzo rispetto al corpo centrale del drone, ed è montato su una struttura/braccio robotico eventualmente dotato di uno o più gradi di libertà, attivi o passivi.

Il drone è caratterizzato da una configurazione non convenzionale con rotori inclinati di angoli predefiniti e fissi, che conferisce alla macchina la capacità di generare forze in tutte le direzioni, a differenza dei classici droni multi-rotore in configurazione convenzionale che non possiedono questa capacità. Questo ha importanti implicazioni in termini di guida, navigazione, e controllo della macchina: infatti, a differenza dei droni in configurazione convenzionale che hanno la capacità di volare solo in volo libero, il drone in questione deve essere in grado di gestire il contatto con l'ambiente circostante, richiedendo di conseguenza sviluppi ad hoc al sistema di guida, navigazione e controllo. Il volo in pilotaggio manuale durante la missione di ispezione a contatto implica un notevole carico di lavoro sul pilota, che oltre a gestire il pilotaggio della macchina in volo libero si trova anche a dovere gestire la fase di approccio e contatto con l'oggetto da ispezionare. In vista di un miglioramento dell'usabilità della macchina, è stata implementata una modalità di volo automatico, soprattutto per quanto riguarda la fase di approccio e contatto, in modo da alleviare il carico di lavoro sul pilota.

Viene descritta sommariamente di seguito la missione di ispezione a contatto di isolatore elettrico con il sistema ARIES; la missione si può generalizzare ad altre applicazioni di ispezione a contatto:

- Il drone decolla e viene pilotato fino a trovarsi di fronte al punto di ispezione ed allineato rispetto al target.
- Viene avviata la manovra di contatto automatica: il drone si muove traslando con assetto orizzontale, a quota costante e a velocità costante in direzione frontale, approcciando il target fino a che non viene stabilito il contatto con l'isolatore.
- A quel punto il drone si ferma contro l'isolatore, spingendo con forza di contatto costante in direzione frontale, per tutta la durata dell'ispezione; il sensore scorre lungo l'isolatore, attuato dal sistema di movimentazione attivo del payload, raccogliendo misure durante lo scorrimento.
- Al termine della misura il drone rilascia il contatto, distaccandosi dall'isolatore e tornando indietro percorrendo in direzione opposta la traiettoria di andata. Il pilota ha in ogni caso la possibilità di intervenire correggendo con gli stick del radiocomando la traiettoria del drone durante l'approccio.
- Il pilota può decidere di effettuare un'altra misura a contatto in una sezione diversa dell'isolatore, spostarsi su un altro isolatore, o atterrare.

Per quanto riguarda il payload, oltre alla specifica applicazione dell'ispezione su isolatore, è stato considerato un insieme di payload in base al tipo di missioni di ispezione a contatto di interesse. Il drone è stato sviluppato in modo da avere la capacità di portare payload differenti, e in modo da essere facilmente configurabile montando/smontando il payload da utilizzare di volta in volta. Sono stati considerati payload tra i componenti disponibili sul mercato commercializzati da produttori di terze parti. Nello sviluppo del sistema è stata posta particolare enfasi sull'integrazione hardware del payload con la macchina: è stata sviluppata un'interfaccia meccanica-elettronica tra la macchina e il payload, e un meccanismo per vincolare opportunamente il payload alla macchina, dotandolo eventualmente di cedevolezza e di uno o più gradi di libertà (es. per fare scorrere il sensore lungo certe direzioni di interesse) anche con movimentazione attiva. Un requisito considerato in fase di sviluppo è la possibilità di integrare eventualmente in futuro altri payload con la macchina.

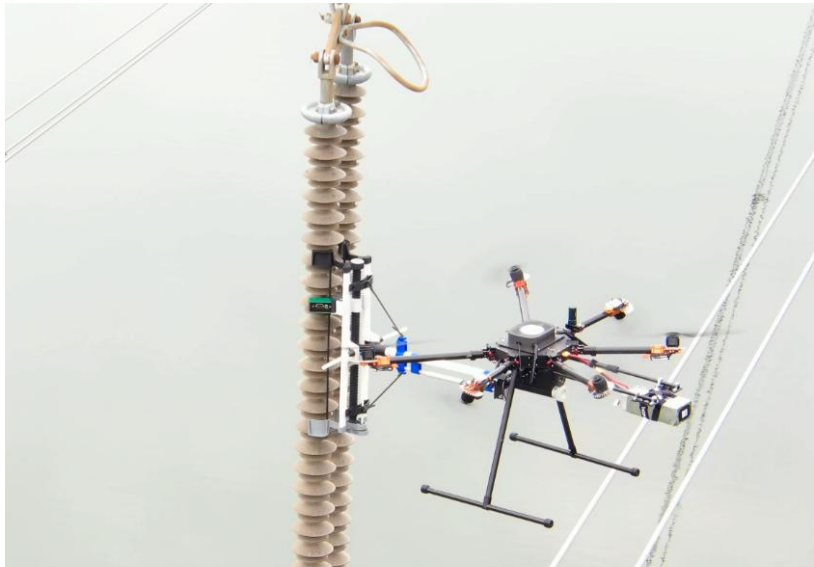


Figura 4: Prima versione del prototipo del sistema ARIES, durante una dimostrazione.



Figura 5: Drone ARIES, versione 2 del prototipo. Vista laterale.



Figura 6: Sistema ARIES nella configurazione con payload per ispezione di isolatori.



Figura 7: Sistema ARIES durante una dimostrazione di ispezione a contatto contro mock-up di isolatore.

#### **4. *Sperimentazione con operatori europei***

In questa sezione viene sinteticamente riportata l'esperienza raccolta nell'ambito di sperimentazioni della soluzione ARIES condotte in collaborazione con alcuni TSO europei della rete elettrica in alta tensione nei rispettivi Paesi di origine, e che costituiscono potenziali end-user della soluzione. Vengono riportati i feedback raccolti durante la sperimentazione, evidenziando gli aspetti positivi emersi nella sperimentazione e quelli oggetto di ulteriori sviluppi futuri della soluzione proposta.

##### **4.1 *Caso d'uso #1: operatore italiano***

Nell'ambito della collaborazione con un importante TSO operante in Italia, sono stati svolti diversi test e dimostrazioni volti a validare la capacità del sistema di:

- operare in ambiente reale su linea elettrica ad alta tensione (sia in assenza di tensione, che sotto tensione di linea);

- svolgere una missione completa (approccio, contatto, distacco dall'isolatore);
- mantenere stabilità e prestazioni di navigazione e controllo adeguate durante il contatto con l'isolatore;
- verificare l'assenza di interferenze causate dal drone sull'operatività della linea, e viceversa.

È previsto prossimamente lo svolgimento di una campagna sperimentale estensiva in ambiente reale volta a validare la funzionalità del sistema.

#### **4.2 Caso d'uso #2: operatore UK**

È stata svolta una dimostrazione di ispezione a contatto su un isolatore nell'ambito di una giornata dedicata all'innovazione organizzata a Febbraio 2025 da un TSO operante nel Regno Unito. Verrà organizzata prossimamente un'altra demo dedicata con lo stesso operatore.

#### **4.3 Caso d'uso #3: operatore tedesco**

La soluzione ARIES è stata esposta nell'ambito di un evento dedicato all'innovazione organizzato da un TSO operante in Germania. Era inizialmente prevista una dimostrazione dal vivo su un setup di isolatore, poi cancellata causa maltempo. La demo verrà riprogrammata prossimamente.

#### **4.4 Caso d'uso #4: operatore turco**

È stata svolta una dimostrazione di ispezione a contatto su un isolatore in ambiente operativo reale a Gennaio 2025 presso un TSO operante in Turchia. Verrà organizzata prossimamente un'altra demo dedicata con lo stesso operatore.

#### **4.5 Risultati della sperimentazione e feedback dagli end user**

Dall'attività sperimentale finora svolta in cooperazione con gli operatori, sono emersi i seguenti aspetti positivi:

- capacità del sistema di mantenere il contatto in maniera stabile;
- capacità di portare il payload a contatto;
- assenza di mutue interferenze tra drone e linea;
- capacità di ottenere misure comparabili con il metodo tradizionale (usato come *ground truth*);
- evidente miglioramento della sicurezza per gli operatori umani;
- riduzione di tempi di ispezione;
- miglioramento dell'efficienza e dei costi di ispezione con semplificazione delle procedure.

Tra gli aspetti oggetto di ulteriore sviluppo (già svolto, o da svolgere in futuro), si evidenziano i seguenti.

È stato riscontrato che l'inviluppo operativo in termini di capacità di operare in presenza di **vento** risulta più ristretto rispetto a droni multi-rotore della stessa classe di

peso; questo aspetto è rilevante in quanto ci si aspetta presenza di vento maggiore che in Italia, in certe zone geografiche (es. nei Paesi del Nord Europa e/o vicino al mare) e in certe stagioni dell'anno.

Questo aspetto è intrinsecamente dovuto alla configurazione adottata per il drone (denominata *fixed-tilt multi-rotor*). Rispetto ad un drone multi-rotore in configurazione convenzionale (che risulta *under-actuated* in quanto il numero di variabili di controllo a disposizione è maggiore del numero delle variabili controllate), la configurazione considerata è *fully-actuated*, ovvero il numero di variabili di controllo a disposizione è pari al numero delle variabili controllate.

Il fatto di controllare un numero di gradi di libertà aggiuntivi rispetto alla configurazione convenzionale riduce il margine di controllo a disposizione per la resistenza ai disturbi esterni. Inoltre, va tenuto conto che in modalità "contatto" il drone deve garantire elevata precisione in termini di controllo e navigazione; questo comporta un incremento dell'effort di controllo necessario per mantenere il livello di precisione richiesto, se confrontato con un drone in configurazione convenzionale che è progettato per svolgere missioni in volo libero. Di conseguenza, le prestazioni in termini di resistenza ai disturbi di vento di una macchina in configurazione non convenzionale, progettata per ispezioni a contatto, non sono direttamente confrontabili con quelle di un multi-rotore in configurazione convenzionale.

Tra le possibili direzioni di sviluppo che possono portare a mitigare questa restrizione, permettendo di allargare l'involuppo operativo, si evidenziano le seguenti:

- Revisione del progetto della macchina in modo da garantire un involuppo di forza diverso e più ampio nell'intorno delle condizioni in cui la macchina si trova ad operare più di frequente, e quindi maggiore capacità di reagire ai disturbi di vento.
- Implementazione di algoritmi di controllo che prevencono situazioni in cui il drone si viene a trovare a ridosso dei limiti operativi, di conseguenza garantendo maggiore stabilità e sicurezza nell'operazione.

La presenza di potenziali **disturbi elettromagnetici** sui sensori utilizzati per la navigazione del drone, dovuta all'operazione del drone in vicinanza alla linea in tensione, ha portato a rivedere il sistema di navigazione in modo da garantire maggiore robustezza a tali disturbi.

Il pilotaggio manuale della macchina impone un workload elevato al pilota che, oltre ad occuparsi di seguire il velivolo, deve gestire la fase di approccio, contatto, e distacco, e di evitare gli ostacoli circostanti. Per questo motivo lo sviluppo è indirizzato ad un maggiore livello di **automazione**, in modo da alleviare il carico sul pilota.

È stato sviluppato un algoritmo di guida che permette di effettuare automaticamente la fase di approccio, contatto, e distacco. In futuro verranno implementate ulteriori funzionalità per automatizzare l'intera missione, compreso il riconoscimento e l'avvicinamento all'isolatore, anche grazie ad algoritmi di AI.

## 5. Conclusioni

È stata descritta la soluzione ARIES basata su drone per ispezioni a contatto di asset e infrastrutture, con focus sull'ispezione di linee elettriche ad alta tensione. La possibilità di effettuare ispezioni a contatto rappresenta un'importante novità nell'ambito delle ispezioni NDT con drone, ed apre la strada a molteplici nuovi scenari applicativi, tra cui si segnalano ispezioni spessimetriche UT, ispezioni di pareti e travi in cemento armato con ground penetrating radar (GPR), e molte altre.

È stata svolta attività sperimentale in collaborazione con diversi TSO di diverse nazionalità, che rappresentano i potenziali end user della soluzione. La validazione sperimentale e il feedback raccolto dagli utenti sono risultati indispensabili da un lato per validare la funzionalità della soluzione proposta ed i benefici che si possono ottenere nell'operazione in ambiente reale, e dall'altro per orientare le successive attività di sviluppo in vista di migliorare iterativamente la soluzione.

## Acknowledgments

Il sistema ARIES è stato sviluppato nell'ambito di una collaborazione con DRB srl. ANT-X ha progettato e sviluppato il drone su commissione di DRB. Il payload è stato ingegnerizzato e sviluppato da DRB.

ANT-X è uno spin-off del Politecnico di Milano che si occupa di soluzioni in ambito droni per la didattica, la ricerca e le applicazioni industriali. ANT-X possiede le competenze necessarie per svolgere l'intero ciclo di progetto, prototipazione, integrazione, e test in volo di piattaforme Unmanned Aerial Vehicle (UAV) custom.

DRB srl è uno spin-off del Politecnico di Milano ed opera nel mercato delle ispezioni con drone. Il sensore Positron Composite Insulator Tester utilizzato nell'ambito della sperimentazione è prodotto e fornito da Positron Power.

Parte delle attività descritte sono state svolte nell'ambito del progetto "Sviluppo di una tecnologia innovativa basata su drone in grado di svolgere ispezioni a contatto per migliorare la sicurezza e la protezione delle infrastrutture" finanziato dal Programma regionale a valere sul Fondo Europeo di Sviluppo Regionale 2021/2027 di Regione Lombardia PR FESR 2021-2027, Azione 1.1.1. "Sostegno agli investimenti in ricerca, sviluppo e innovazione", cofinanziato da Unione Europea e Regione Lombardia sulla Misura Ricerca & Innova, legge regionale n. 9 del 20/05/2022 e D.G.R. n. XI/7151 del 17/10/2022.

## BIBLIOGRAFIA

- ARIES page on ANT-X website: <https://antx.it/industrial-drones-antx/aries/>
- Anibal Ollero, Marco Tognon, Alejandro Suarez, Dongjun Lee, Antonio Franchi. Past, Present and Future of Aerial Robotic Manipulators. IEEE Transactions on Robotics, IEEE, 2022, 38 (1), pp.626- 645. 10.1109/TRO.2021.3084395. hal-03255846
- Terna. Relazione finanziaria annuale 2021, rapporto integrato.
- Positron Power website: <https://positronpower.com/>

## CONTROLLI NON DISTRUTTIVI IN SPAZI CONFINATI

Gianluca Dal Bianco – Sales Representative, ITALSABI Srl

### SOMMARIO

La memoria tecnica presentata da **Italsabi Srl** illustra l'evoluzione dei Controlli Non Distruttivi (CND) in ambienti confinati, con particolare attenzione all'impiego di tecnologie avanzate come droni e bracci robotizzati. Gli ambienti confinati, definiti dalla norma **UNI 11958:2023**, rappresentano contesti ad alto rischio per gli operatori, richiedendo soluzioni innovative per garantire la sicurezza e l'efficienza operativa. **Italsabi** ha introdotto dal **2018** l'utilizzo di droni per ispezioni visive e termografiche, anticipando il mercato italiano e contribuendo alla diffusione di metodologie non invasive. La partecipazione a convegni e seminari ha permesso all'azienda di individuare tecnologie sempre più performanti, culminando nel 2025 con l'adozione di sistemi robotizzati hibot. La normativa vigente impone una struttura operativa specifica per le attività in spazi confinati, ma le difficoltà nel reperire personale qualificato e l'impossibilità di eliminare i rischi residui degli spazi confinati, rendono strategico l'impiego di soluzioni automatizzate. **Secondo i dati INAIL, gli incidenti in ambienti confinati sono ancora numerosi**, evidenziando la **necessità di un approccio tecnologico e normativo integrato**. Le tecnologie proposte consentono ispezioni sicure, rapide e certificabili, riducendo l'esposizione al rischio e semplificando gli iter burocratici. La memoria si conclude con una riflessione sull'importanza dell'innovazione e della collaborazione tra aziende, enti normativi e committenti per promuovere la sicurezza e la qualità nei processi industriali.

### 1. Introduzione

**Gli ambienti confinati**, come definiti dalla norma **UNI 11958:2023**, sono spazi circoscritti non progettati per la permanenza continuativa degli operatori, ma accessibili per lo svolgimento di attività lavorative. Questi ambienti presentano vie di accesso limitate, ventilazione sfavorevole e potenziali rischi di natura chimica, fisica o biologica. La gestione della sicurezza in tali contesti richiede l'adozione di tecnologie avanzate, volte a minimizzare l'esposizione diretta del personale. **Italsabi** opera all'interno dei principali siti chimici e petrolchimici nazionali nel settore della **manutenzione predittiva**. Nonostante una rigorosa gestione della formazione del personale — considerata uno degli asset fondamentali dell'azienda — e il rispetto della documentazione tecnica, dell'informazione sui rischi correlati alle attività multi-sito e delle disposizioni del Testo Unico sulla Sicurezza, l'operare in molteplici siti comporta criticità e problematiche **endemiche**, soprattutto nelle aree e apparecchiature classificate come **spazi confinati**.

Fin dal 2018, Italsabi ha cercato soluzioni alternative all'impiego diretto dei propri dipendenti in ambienti confinati, introducendo l'utilizzo di **droni a pilotaggio**

**remoto** per le ispezioni visive. Siamo stati tra le prime società italiane nel settore dei **Controlli Non Distruttivi (CND)** ad adottare questa metodologia per ispezioni visive e termografiche su strutture industriali e civili, apparecchiature, pannelli fotovoltaici e parchi eolici.

Nel 2018, ho avuto l'onore di partecipare, con **l'Associazione Italiana Prove Non Distruttive (AIPnD)**, al seminario *"L'applicazione dei Controlli Non Distruttivi per la valutazione della sicurezza dei ponti"*, un tema purtroppo di grande attualità dopo il disastro del Ponte Morandi di Genova. È stata una giornata fondamentale non solo per chi, come noi, esegue CND, ma per tutto il sistema Paese, culminata con la firma di una convenzione tra **UNCENM** (Unione Nazionale Comuni, Comunità ed Enti Montani) e l'Associazione.

Con la nascita di un mercato per le ispezioni con droni da esterno, lo sviluppo veloce e continuo della tecnologia — principalmente asiatica — estesa anche ai **payload** (fotocamere, termocamere e sonde ad ultrasuoni), e la formazione di personale Italsabi dedicato all'utilizzo di **Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR)**, ci siamo spinti verso la ricerca di droni specifici per le ispezioni in spazi confinati. Il nostro servizio in questo ambito ha avuto all'inizio un andamento altalenante, a causa delle difficoltà pionieristiche legate all'impiego di mezzi non sempre idonei all'esecuzione del lavoro.

Nel 2023, ho avuto nuovamente l'onore di essere invitato come membro del comitato tecnico AIPnD al **"1° Convegno Droni e Controlli Non Distruttivi: Applicazioni e Prospettive"**. Fortemente voluto dal Prof. Silvano Vergura del **Politecnico di Bari**, questo primo seminario ha definito lo stato dell'arte delle ispezioni industriali con l'impiego di droni e roV prospettando l'utilizzo dell'intelligenza artificiale per l'elaborazione dei dati raccolti.

Questo evento ci ha permesso di individuare la tecnologia più adatta per affrontare le ispezioni interne di serbatoi, tubazioni e camini industriali, ottenendo da allora risultati **certificabili e attendibili**.

## 2. **Contesto operativo**

La normativa **UNI 11958** e l'art. 66 **D.Lgs. 81/2008** prevedono una struttura operativa specifica per le attività in ambienti confinati, composta da:

- **Preposto/Supervisor**: responsabile della supervisione delle attività e dell'applicazione delle procedure operative.
- **Lavoratore Attendente**: incaricato della sorveglianza e dell'assistenza durante le operazioni.
- **Lavoratore Entrante**: esecutore delle attività all'interno dello spazio confinato.

Il **committente**, ovvero il gestore dell'impianto produttivo, ha l'obbligo legale di fornire assistenza e supporto al personale tecnico qualificato, inclusi i mezzi per il recupero in caso di emergenza. Tuttavia, per società come la nostra, che intervengono saltuariamente su chiamata in diversi siti, risulta complesso garantire una formazione dedicata e specifica per ogni impianto.

È il gestore, che conosce nel dettaglio le caratteristiche del proprio impianto, a dover predisporre gli ausili necessari per la gestione delle emergenze. Questo principio, però, **non si applica nei cantieri temporanei** regolati dal **Titolo IV del D.Lgs. 81/2008**, come ad esempio durante le fermate di impianto.

### 3. Criticità e necessità

Secondo la relazione **INAIL 2023**, in Italia si registrano annualmente tra **30 e 50 incidenti in ambienti confinati**, con una media di 5-10 eventi mortali. I settori maggiormente coinvolti includono:

- Trattamento acque e fognature
- Industria chimica e alimentare
- Manutenzione di serbatoi, silos e cisterne
- Costruzioni e cantieri navali

Per poter operare all'interno di uno stabilimento cliente che richiede controlli in spazi confinati, la nostra società deve disporre non solo di personale qualificato per l'esecuzione dei **Controlli Non Distruttivi (CND)** — suddivisi in tre macrocategorie: **volumetrici, superficiali** e **avanzati** — ma anche di una squadra composta da:

- un **preposto**,
- un **lavoratore attendente**
- Personale con corso di **primo soccorso** e **corso antincendio**.

La composizione di questa squadra, necessaria per interventi sia programmati che in emergenza, richiede competenze tecniche e formative sempre più difficili da reperire nei tempi richiesti.

In questo contesto, l'utilizzo di tecnologie come **droni** e **sistemi robotizzati** rappresenta una soluzione strategica:

- Consente di operare ovviamente e prioritariamente in **massima sicurezza**, riducendo l'esposizione al rischio del personale
- **Snellisce gli iter burocratici e logistici** legati all'ingresso nei siti produttivi.

### 4. Soluzioni tecnologiche avanzate

L'impiego di droni e bracci robotizzati rappresenta una svolta significativa nell'ambito dei Controlli Non Distruttivi (CND), soprattutto quando applicati in ambienti confinati, dove la sicurezza degli operatori deve essere l'importanza primaria per la corretta esecuzione dell'intervento. Queste tecnologie consentono di eseguire ispezioni visive, termografiche e ultrasoniche senza la necessità di accesso diretto da parte del personale, riducendo drasticamente l'esposizione ai rischi.



Foto 1: accesso con drone in spazio confinato

I vantaggi operativi sono molteplici:

- **Acquisizione di dati in tempo reale**, con possibilità di analisi immediata e archiviazione digitale.
- **Analisi strutturale avanzata**, utile per la manutenzione predittiva e la pianificazione degli interventi. I dispositivi “navigano” all’interno dello spazio confinato ispezionato grazie alla ricostruzione 3D dell’ambiente con metodologie sempre più sofisticate come LIDAR e LASER SCANNER
- **Accesso a zone critiche**, dove le condizioni atmosferiche o strutturali renderebbero pericoloso l’ingresso umano.

Queste soluzioni non solo migliorano la sicurezza, ma ottimizzano anche i tempi e i costi di intervento, rendendo possibile operare in contesti prima considerati troppo complessi o rischiosi.

È fondamentale che le attrezzature impiegate siano conformi alla **Direttiva Macchine 2006/42/CE**, e progettate tenendo conto delle **specifiche dell'ambiente operativo**, come la presenza di gas, polveri, umidità, spazi ristretti o superfici irregolari. L'integrazione di queste tecnologie nei processi di ispezione rappresenta non solo un'evoluzione tecnica, ma anche una risposta concreta alle crescenti difficoltà nel reperire personale qualificato per operazioni in ambienti confinati. In questo scenario, l'innovazione diventa un alleato strategico per garantire continuità operativa, sicurezza e qualità del controllo.

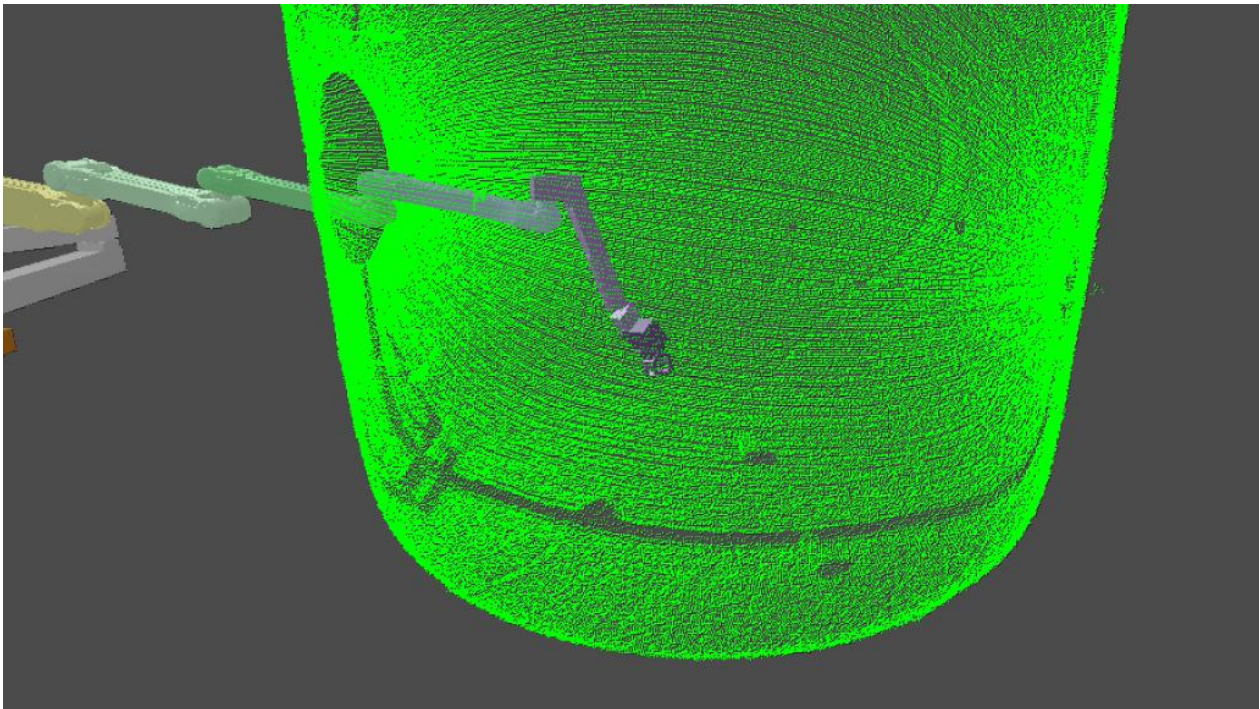


Foto 2: Elaborazione 3D dell'ambiente ispezionato

## 5. Conclusioni

L'evoluzione tecnologica applicata ai **Controlli Non Distruttivi in ambienti confinati** rappresenta oggi una risposta concreta alle sfide operative, normative e organizzative che le aziende del settore si trovano ad affrontare quotidianamente.

Si è volutamente fatto riferimento per definire gli **spazi confinati**, alla norma **UNI 11958:2023** essendo la finalità e l'ambito di applicazione del decreto n. 177 del 14 settembre 2011 in attesa di definizione.

Certo, vi sono ancora dei limiti tecnici legati alla velocità di esecuzione o a limiti delle macchine ma come tutte le nuove tecnologie, il loro utilizzo nel settore industriale ne permetterà di scoprirne i limiti e di ampliarne le potenzialità. Lo scoglio principale rimane ad ogni modo la resistenza al cambiamento e la radicalizzazione delle prassi, urge muoversi verso una unica armonizzazione delle regole nelle ispezioni con buone pratiche che implementino soluzioni sicure e virtuose come le tecnologie di ispezione da remoto.

L'esperienza maturata da Italsabi, unita all'adozione di **droni e sistemi robotizzati**, ha dimostrato come sia possibile coniugare **sicurezza, efficienza e qualità del controllo**, anche in contesti ad alto rischio e complessità. L'integrazione di queste soluzioni consente non solo di ridurre l'esposizione del personale, ma anche di **ottimizzare tempi e risorse**, semplificando l'accesso ai siti e migliorando la gestione delle emergenze.

In un panorama industriale in continua trasformazione, dove la disponibilità di personale qualificato è sempre più limitata, l'innovazione tecnologica non è più un'opzione, ma una **necessità strategica**. È fondamentale che le aziende, i committenti e gli enti normativi collaborino per promuovere l'adozione di strumenti avanzati, investendo nella **formazione**, nella **standardizzazione delle procedure** e nella **condivisione delle buone pratiche**.

Solo attraverso un approccio integrato e lungimirante sarà possibile garantire un futuro in cui la **sicurezza operativa** e la **qualità del controllo** siano realmente al centro dei processi industriali.

**Ripongo la mia ultima speranza in queste note: che nelle società con grandi capitali, dove gli investimenti in ricerca e sviluppo possono fare la differenza, venga dedicato un impegno concreto di risorse allo sviluppo di tecnologie che mettano al centro la tutela e i diritti dei lavoratori.**



Foto 3: rilievo interno del recipiente con fotocamera HD del braccio robotizzato



Foto 4: rilievo del monaco del tetto di un serbatoio con drone

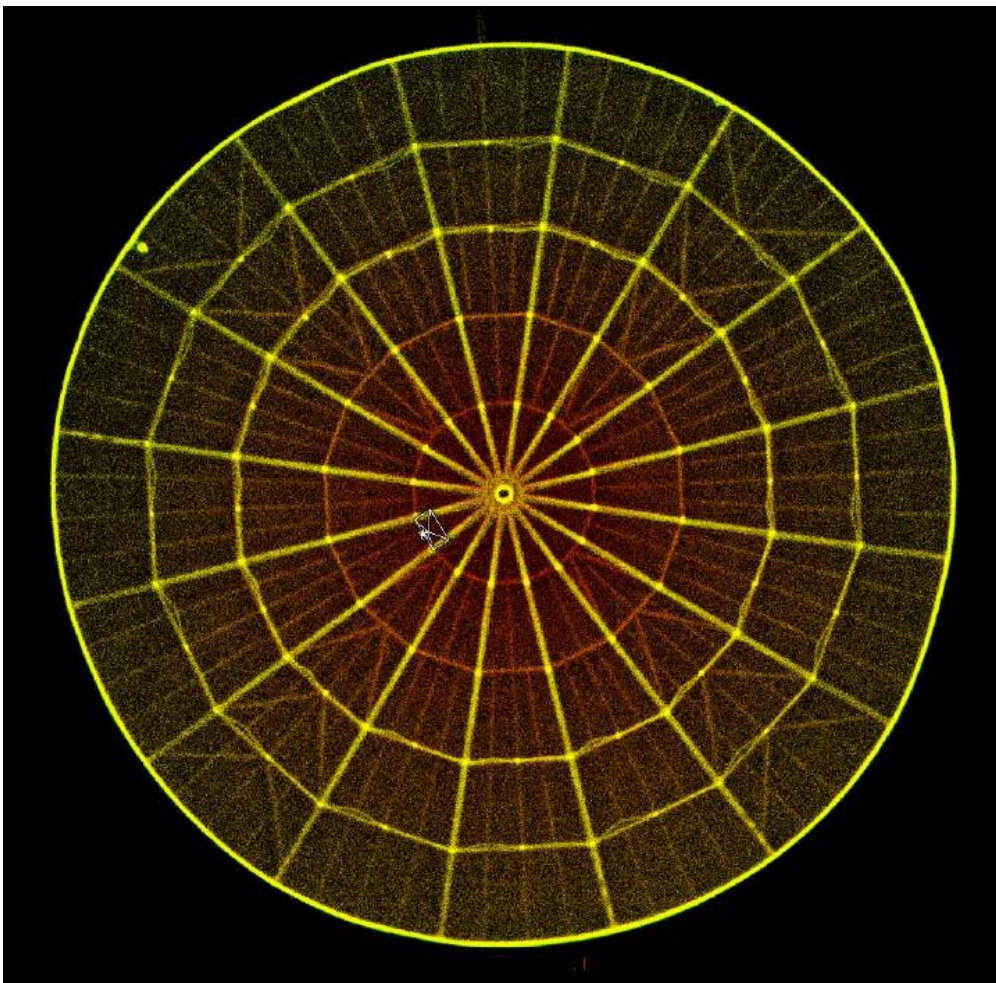


Foto 5: posizionamento dell'immagine acquisita

## BIBLIOGRAFIA

- Associazione Italiana Prove Non Distruttive (AIPnD). (2023). 1° Convegno Droni e Controlli Non Distruttivi: Applicazioni e Prospettive. Politecnico di Bari.
- Direttiva Macchine 2006/42/CE. (2006). Normativa europea sulla sicurezza delle macchine.
- INAIL. (2023). Relazione annuale sugli infortuni in ambienti confinati. Roma: INAIL.
- UNI 11958:2023. (2023). Ambienti confinati – Definizioni e requisiti di sicurezza. Ente Italiano di Normazione.
- Decreto Legislativo 81/2008. (2008). Testo Unico sulla Sicurezza sul Lavoro. Gazzetta Ufficiale.
- Decreto n. 177 del 14 settembre 2011. (2011). Qualificazione delle imprese operanti in ambienti sospetti di inquinamento o confinati. Gazzetta Ufficiale.
- [1] UNI 11958:2023, Ambienti confinati – Definizioni e requisiti di sicurezza, Ente Italiano di Normazione, 2023.
- [2] Decreto Legislativo 81/2008, Testo Unico sulla Sicurezza sul Lavoro, Gazzetta Ufficiale, 2008.
- [3] Decreto n. 177 del 14 settembre 2011, Qualificazione delle imprese operanti in ambienti sospetti di inquinamento o confinati, Gazzetta Ufficiale, 2011.
- [4] INAIL, Relazione annuale sugli infortuni in ambienti confinati, Roma, 2023.
- [5] IEEE Std 1937.1-2020, IEEE Standard Interface Requirements and Performance Characteristics of Payload Devices in Drones, IEEE Communications Society, 2020. [standards-global.com]
- [6] ISO 9712:2021, Non-destructive testing — Qualification and certification of NDT personnel, International Organization for Standardization, 2021. [iso.org]
- [7] ANSI/ASSP Z117.1, Safety Requirements for Confined Spaces, American Society of Safety Professionals, 2021. [assp.org]

## DALL'INNOVAZIONE ALLA REGOLAMENTAZIONE EUROPEA: IL PERCORSO DEGLI STANDARD ARMONIZZATI ALLA NORMATIVA DEI DRONI PER L'INDUSTRIA

C. Scafa - UNAVIA

### ABSTRACT

La regolamentazione europea sugli UAS (Unmanned Aircraft System) ha una importanza strategica sia dal punto di vista tecnico-giuridico, sia per lo sviluppo economico e sociale del settore. Non è solo un insieme di regole tecniche, ma uno strumento politico ed economico per garantire sicurezza, protezione dei cittadini e crescita armonizzata di un settore in forte espansione.

Gli standard armonizzati della serie EN 4709, preparati da ASD-STAN e CEN, hanno lo scopo fondamentale di fornire dei mezzi di conformità per l'attuazione pratica alla regolamentazione europea sugli UAS.

L'Europa è all'avanguardia per quanto riguarda le regolamentazioni del settore molto avanzate, ma bisogna anche sostenere l'industria europea dei droni ed a questo scopo servono standard armonizzati che indichino i mezzi di conformità per rispondere ai requisiti applicabili.

Questo è fondamentale anche nel campo dei CND perché significa garantire la sicurezza, l'indipendenza strategica e la leadership tecnologica per essere non solo un semplice regolatore, ma un protagonista globale.

### 1. Introduzione

Prima del regolamento (UE) 2019/947 e 2019/945 ogni Stato membro aveva le proprie regole, creando molta frammentazione e quindi difficoltà al comparto industriale del settore.

L'Autorità di certificazione europea (EASA) ha introdotto un quadro normativo unico che vale per tutti i paesi facenti parte della UE e non solo. Questo comporta indubbi vantaggi innanzitutto per l'uso transfrontaliero degli UAS secondo regole comuni e applicabili in tutti questi paesi.

Le norme definiscono categorie operative (OPEN; SPECIFIC; CERTIFIED) basate sul rischio, oltre che sul peso del drone.

Lo scopo di questo approccio è quello di garantire la sicurezza degli spazi aerei e delle persone a terra senza interferire sul valore innovativo delle tecnologie messe in atto.

Gli aspetti più significativi connessi a questa regolamentazione sono i seguenti:

- Obblighi di registrazione degli operatori e di "Direct Remote Identification" (DRI) per fare in modo che le operazioni effettuate con i droni siano tutte caratterizzate dalla trasparenza e dalla piena tracciabilità
- Contrastare con efficacia l'uso improprio e in certi casi anche potenzialmente illecito dei droni soprattutto per quanto riguarda la sorveglianza abusiva e voli in aree vietate.

- Normative comuni che abbassino le barriere burocratiche consentendo la crescita del settore industriale europeo attraverso l'innovazione tecnologica, sostenendo attività come le consegne con droni, il monitoraggio ambientale, l'agricoltura di precisione, la sicurezza civile e contribuendo allo stesso tempo alla nostra competitività sul mercato globale.

La regolamentazione UAS è collegata anche al rispetto del GDPR (insieme di norme su base comunitaria, pensate per uniformare e armonizzare le regole sulla raccolta e sul trattamento di dati personali all'interno dell'Unione) assicurando i possibili impatti sui dati personali e sulla protezione delle persone filmate o riprese.

Il passo successivo sarà l'integrazione delle attività sviluppate con i droni nel traffico aereo europeo congiuntamente all'aviazione tradizionale e l'utilizzo in servizi avanzati come taxi volanti, droni medici, logistica urbana.

## 2. Generale

Lo scopo dell'intervento è innanzitutto quello di illustrare l'utilità per l'industria di avere degli standard armonizzati alla normativa europea come mezzo per dimostrare la conformità ai requisiti previsti dal decreto delegato (UE) 2019/945.

Un drone conforme agli EN 4709 può essere marcato CE e immesso legalmente sul mercato europeo.

Gli standard armonizzati della famiglia EN 4709 fissano i mezzi di conformità e i "Pass Criteria" per aspetti fondamentali come ad esempio:

- Limitazione della potenza e dell'energia d'urto.
- Trasmissione dei dati identificativi del drone
- Funzioni che avvisano o impediscono al drone di entrare in zone proibite (Geo-awareness; Geo-caging)
- Livelli acustici massimi per ridurre l'impatto ambientale.

La lista degli standard armonizzati è la seguente:

### Gestiti da ASD STAN/CEN

- prEN4709-001 C0-C4 product requirements
- prEN4709-002 DRI
- prEN4709-003 Geoawareness
- prEN4709-004 Light

### Gestiti da CEN

- EN4709-005 Geocaging
- EN4709-006 FTS
- EN4709-007 C5-C6 product requirements
- EN4709-008 Accessory kits

Dovrebbero essere tutti emessi dal CEN come EN entro la fine dell'anno in corso.

È doveroso precisare che gli standard armonizzati non sono obbligatori, ma offrono una “presunzione di conformità” ai regolamenti che aiutano le imprese e favoriscono le attività delle Autorità di vigilanza del mercato e di certificazione della conformità. Le aziende possono anche scegliere soluzioni alternative, purché dimostrino in rispetto dei requisiti dei regolamenti europei.

L'importanza di questi regolamenti e degli standard armonizzati ad essi, si ripercuote nei settori industriale, energetico e delle infrastrutture. Negli Stati Uniti ed in Canada le principali applicazioni sono nel campo delle ispezioni di oleodotti e raffinerie, nell'analisi delle pale eoliche e delle linee elettriche, nel monitoraggio di ponti e grattacieli. In Europa grazie anche ai regolamenti EASA e agli standard armonizzati ci sono settori di punta come le ferrovie per le ispezioni binari e gallerie; infrastrutture civili come ponti, dighe, torri di comunicazione, controlli di impianti ad alto rischio come quelli connessi all'energia nucleare. In Asia ed in particolare in Cina abbiamo un mercato in rapida crescita, una industria leader (DJI) e progetti governativi su smart cities e logistica.

Molto interessante per l'argomento connesso al convegno è la diffusione di droni con IA per riconoscere, a esempio, difetti da immagini termiche. Queste attività possono essere sviluppate evitando rischi per il personale che non è costretto a lavori in quota o in ambienti pericolosi e inoltre determina una riduzione di costi e di tempi di fermo impianto e possibilità di raccogliere dati multispettrali e integrabili con IA e “machine learning” per l'analisi difetti.

### **3. Obiettivi e trend futuro**

L'obiettivo prioritario che si è voluto raggiungere attraverso l'emissione di standard armonizzati alla normativa europea è stato quello di evitare il rischio che i costruttori interpretassero diversamente i requisiti dei regolamenti. Infatti, gli standard armonizzati traducono i principi generali della normativa in specifiche tecniche precise, valide in tutta la UE. L'uniformità tecnica evita frammentazione e garantisce parità di condizioni tra produttori.

Dare la possibilità al fornitore che rispetta gli EN 4709 di vendere in tutti i Paesi UE senza dovere ridisegnare o riprogettare il drone per ciascuna Autorità nazionale. Ciò favorisce la scalabilità industriale e l'ingresso sul mercato di nuovi attori, inclusi PMI e start up.

Gli standard armonizzati della famiglia EN 4709 sono il ponte tra la regolamentazione europea (che stabilisce i requisiti generali) e la pratica tecnica dei costruttori. Senza questi standard, i requisiti resterebbero troppo generici e difficili da applicare in modo uniforme, mettendo a rischio sia la sicurezza sia lo sviluppo del mercato unico dei droni.

Per quanto riguarda l'utilizzo di droni il trend futuro prevede sempre più droni autonomi BVLOS (Beyond visual line of sight) con sensori specifici per NDT (ultrasuoni, radar penetranti, spettrometria); integrazione con sistemi definiti di “Digital Twin”, che nel contesto edilizio, determinano una replica digitale precisa e dinamica di un edificio o di

una sua parte per simulare, monitorare e ottimizzare le prestazioni dell'edificio lungo tutto il suo ciclo di vita, dalla fase di progettazione alla costruzione e gestione operativa. Ovviamente a questo trend futuro dovrà essere affiancata anche una attività di standardizzazione, con il coinvolgimento delle principali organizzazioni del settore a cominciare da ISO e ASTM, per certificare i droni come strumenti affidabili di CND. In sintesi, a livello mondiale i droni stanno passando dall'essere semplici strumenti di ispezione visiva a veri e propri sistemi mobili di diagnostica avanzata per controlli non distruttivi. USA e CINA guidano il mercato, l'Europa punta su regolazione e sicurezza, mentre Medio Oriente ed Asia emergono come settori ad alta specializzazione.

#### **4. Conclusioni**

In questo quadro appena descritto, diventa prioritario favorire l'industria europea dei droni per controlli non distruttivi per ragioni strategiche, economiche e tecnologiche. Serve una industria europea forte per garantire indipendenza strategica e resilienza. Ad oggi gran parte del mercato mondiale dei droni è dominato da player cinesi (DJI) e statunitensi. I rischi sulla sovranità tecnologica sono evidenti soprattutto per la cybersicurezza e il controllo dei dati sensibili raccolti (ad esempio in infrastrutture critiche come ponti, ferrovie, dighe, centrali nucleari, oleodotti). Avere soluzioni tecnologiche europee che creino ecosistemi di innovazione in grado di competere globalmente, riduce il rischio che informazioni sensibili su queste strutture finiscano sotto il controllo di Paesi terzi.

Insomma, bisogna evitare il rischio che l'Europa diventi solo un mercato di consumo, perdendo posti di lavoro qualificati e capacità innovativa.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Eurolex access to European Union Law- Regolamentazione europea droni 2019/945 of 12 March 2019 – Network 360 (Publication office of UE)
- [2] Sky-brary Regulation 2020/1058 amending Regulation 2019/945 introducing two new UAS clauses (ref. Official Journal of the UE)
- [3] Easy-Access Rules for Unmanned aircraft systems (Regulation 2019/947 and 2019/945) – Revision from July 2024 publication data: 10/07/2024
- [4] “Le regole EASA per i droni in Europa – guide alle categorie operative” pubblicato il 14/05/2025 – Luca Mattei (Resercher & Legal consultant presso Cyberethics Lab.)
- [5] “Regolamento droni e conformità: le novità 2024 (data 05/02/2024) – autore: Paolo Bernardoni – Sales Manager ECM)
- [6] Personal Drones – Il quadro normativo per l’impiego civile dei droni: vantaggi e criticità (pubblicato il 26/02/2025)
- [7] Netfdrone – UAS solution “Droni – la riforma della sicurezza aerea dell’Unione Europea” (news pubblicata il 07/05/2021)
- [8] ENAC – Normativa droni – aggiornamento del 10 luglio 2024
- [9] Blog.ilgiornale.it – La rivoluzione delle norme sui droni in Italia e in Europa (ref. Appalti, infrastrutture e trasporti – Rubrica di Giuseppe De Carlo – pubblicata il 10/12/2023)
- [10] Unmanned Aircraft System Delegated Regulation published by Civil Aviation Authority, 2024
- [11] DIN – Publication of NA 131-01-02 AA document number DIN EN 4709-001 Edition 2024-10 – draft standard
- [12] CEN/CENELEC position paper on the EC Action Plan on synergies between civil, defence and space industries – dated January 2022
- [13] ANSA.it – Nasce a Ortona un sistema anti-drone (redazione ANSA del 30/07/2019)
- [14] ComplianceGate – Drone Regulation in the UE – An overview posted on December 9, 2024 by Ivar Mallocci
- [15] CEN/CENELEC : CEN and ASD-STAN lauched the public enquiry for a new standard on drones – posted on 2021/07/05



## ISPEZIONI TERMOGRAFICHE CON DRONE DI IMPIANTI FOTOVOLTAICI: OBIETTIVI E COMPETENZE.

B. Moscariello – Ingegneri S.r.l.

L'ispezione di un impianto fotovoltaico, in particolare del campo fotovoltaico, inteso essenzialmente dei moduli fotovoltaici, delle strutture che li sostengono e dei collegamenti elettrici, richiede l'intervento di squadre di tecnici specializzati, attrezzati per l'esame visivo e termografico, che devono esaminare ogni singolo modulo, con l'uso di strumenti palmari.

Tali operazioni, oltre ad essere molto dispendiose, in termini di risorse (uomini e mezzi), richiede delle tempistiche notevoli, in funzione della grandezza e della ubicazione del campo fotovoltaico, ponendo inoltre anche problematiche importanti di sicurezza dei lavoratori che le eseguono.

I droni equipaggiati di telecamere RGB, spesso in 4 e 8k, e termocamere, in alta definizione, hanno rivoluzionato le operazioni di ispezione nel settore della manutenzione fotovoltaica.

Con l'ausilio di queste tecnologie, si riesce a garantire l'efficienza degli impianti fotovoltaici, ridurre i costi operativi delle ispezioni e a prevenire i malfunzionamenti invisibili a occhio nudo, effettuando una vera e propria analisi predittiva del campo fotovoltaico. La termografia aerea, con l'ausilio di droni, rappresenta uno strumento polivalente per la diagnostica, il monitoraggio e la manutenzione preventiva degli impianti fotovoltaici, permettendo di intervenire tempestivamente e in modo molto preciso, consentendo, ad esempio per un impianto fotovoltaico da 1 MWp, l'ispezione in poche ore, a fronte delle molte ore se non giorni di una ispezione a mano, e senza interruzioni nell'operatività dell'impianto.

### **1. Competenze necessarie**

Effettuare correttamente indagini termografiche con l'ausilio di droni, richiede molta formazione ed esperienza.

È necessaria una competenza multidisciplinare, le variabili in gioco sono molte, dai fattori ambientali e atmosferici alle proprietà e caratteristiche tecniche degli oggetti di indagine. In sintesi, bisogna essere un pilota SAPR, essere un Termografo certificato e avere delle conoscenze di impiantistica elettrica, in particolare di fotovoltaico, bisogna inoltre disporre, di Droni (SAPR) registrati D-Flight e abilitati ENAC, in qualità di Operatori SAPR, e ancora di payload termici, termocamere radiometriche, capaci di rilevare le differenze di temperatura, con la massima risoluzione disponibile, almeno 640×512 pixel.

#### **1.1 Operatore SAPR**

L'Operatore SAPR, o Operatore di Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto, è responsabile dell'utilizzo e della gestione di droni per scopi professionali.

All'Operatore SAPR, compete la registrazione dei droni all'ENAC e D-Flyght, e tutte le incombenze burocratiche necessarie per l'autorizzazione al volo, in sicurezza, in spazi

aerei riservati ed autorizzati. All'Operatore spetta la comunicazione con gli enti locali e le autorità per ottenere i nulla osta necessari al volo.

### **1.2 Pilota SAPR**

Il Pilota SAPR detiene le abilitazioni, tecniche, per poter pilotare un drone (SAPR), è quindi addestrato e certificato, dall'ENAC (Ente Nazionale Aviazione Civile), per far volare un SAPR.

Inoltre, per fare i rilievi termografici deve essere Operatore addetto alle Prove non Distruttive (PnD), Termografia Infrarossa TT, qualificato almeno al Livello 1, in conformità alla norma UNI EN ISO 9712:2022.

### **1.3 Termografo certificato**

Il tecnico, che redige il Report dell'indagine termografica dell'impianto fotovoltaico, deve essere un Operatore addetto alle Prove non Distruttive (PnD), Termografia Infrarossa TT, qualificato almeno al Livello 2, in conformità alla norma UNI EN ISO 9712:2022.

Ad esempio, senza una solida conoscenza dei principi della radiometria, scienza che si occupa dello studio della misura delle radiazioni elettromagnetiche, non si può effettuare una indagine termografica.

### **1.4 Conoscenze di elettrotecnica e impiantistica elettrica**

Il Tecnico che gestisce l'operazione di rilievo termografico dell'impianto fotovoltaico e/o che redige il Report sarebbe auspicabile che abbia delle competenze di impiantistica elettrica e più in generale di elettrotecnica, per poter dare le corrette interpretazioni delle anomalie termiche che si riscontrano e dare le opportune indicazioni per la risoluzione dei problemi individuati.

## **2. Elementi caratteristici importanti di droni e termocamere**

### **2.1 Droni**

Il drone con termocamera rappresenta uno strumento di lavoro versatile e potente per la realizzazione di una indagine termografica aerea del campo fotovoltaico.

In commercio esistono numerose soluzioni tecniche, si evidenzia l'importanza di alcuni aspetti:

Un drone che non abbia la termocamera integrata, ma che abbia la possibilità di cambiare *payload*, consente di avere più soluzioni tecniche, termocamere con ottiche diverse che aggiungono flessibilità al lavoro;

*Stabilità*, un drone professionale, normalmente di dimensioni maggiori, assicura una certa stabilità durante gli scatti termografici, permettendo di realizzare foto ben definite, anche in condizioni atmosferiche più impegnative;

*Software*, importante disporre di software professionali che consentano un tempo di acquisizione della immagine termica basso e una trasmissione delle immagini termiche, in real time, al radiocomando di pilotaggio, veloce e con qualità.

## 2.2 Termocamere

Le termocamere funzionano rilevando un determinato intervallo di radiazione elettromagnetica infrarossa anziché la luce visibile. Una termocamera cattura l'energia a infrarossi ed elabora i dati per creare un'immagine, cosiddetta in falsi colori, che raffigura una scena e la temperatura degli oggetti al suo interno.

Esse, sono costituite essenzialmente, da un obiettivo, un sensore termico e componenti elettronici interni che elaborano l'immagine. L'ottica direziona l'energia infrarossa sul sensore e maggiore è il numero di pixel nel sensore, più dettagliata sarà l'immagine. La temperatura è rilevata per pixel; algoritmi interni all'apparecchiatura, si utilizzano per mappare i dati in modo accurato e veloce.

### Risoluzione dell'immagine

La risoluzione dell'immagine di un sensore termico è data dal numero di pixel del sensore, quindi maggiore è la risoluzione, maggiori saranno i dettagli che si acquisiscono e più accurate sono le misure. Tipicamente 640x512 pixel.

### Range di temperatura

È lo spettro di temperature che la termocamera è in grado di riconoscere e misurare. Frequentemente, le termocamere hanno più di un range di temperature, rendendole adattabili a diversi scenari. Tipicamente -25 a 135 °C.

### Banda spettrale

Ogni termocamera lavora su una banda di radiazione specifica. Ciò determina la gamma di lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico che il sensore rileva.

Tipicamente, infrarosso a onde lunghe compreso tra 8µm e 14µm.

### Sensibilità termica (NETD)

La sensibilità termica si riferisce alla più piccola differenza di temperatura possibile che la fotocamera consente di vedere si preferisce un NETD basso, che indica un sistema di imaging termico altamente sensibile. Tipicamente  $\leq 50$  mK.

### Campo visivo (FOV)

Il campo visivo è quanto di una scena può vedere un obiettivo. Un obiettivo grandangolare offrirà immagini termiche più utili quando si è vicini al soggetto, diversamente, un obiettivo più stretto o un teleobiettivo, consentirà di mettere a fuoco una parte particolare della scena. Valori tipici 6°, 24°, 42°.

### Campo visivo (IFOV)

IFOV o risoluzione geometrica, il primo parametro FOV, indica il campo visivo globale della termocamera, mentre il parametro IFOV indica il campo visivo del singolo pixel in mrad/pixel.

## 3. Cosa possiamo osservare con un drone equipaggiato di termocamera

Le potenzialità di osservazione con i droni sono notevoli, si consideri che normalmente sono equipaggiati con termocamere ad infrarosso in alta definizione che includono o sono affiancate da fotocamere RGB con alte prestazioni e diverse ottiche.

Pertanto, si possono eseguire indagini visive per verificare l'integrità fisica e meccanica della struttura che supporta il campo fotovoltaico ed i moduli stessi, oltre a ciò su cui ci stiamo focalizzando, cioè l'analisi termica del campo fotovoltaico e le possibili anomalie termiche, di seguito le più diffuse.



Figura 1- Modulo fotovoltaico con diodo di bypass non funzionante.

### 3.1 Hot spot

L'Hot spot è un fenomeno di surriscaldamento delle celle fotovoltaiche, spesso dovuto a ombreggiamenti o a sporcizia localizzata, la produzione di corrente della cella si riduce in proporzione alla superficie oscurata della stessa.

Nei casi in cui la cella smette di funzionare, diventa essa stessa un carico per le altre celle costituenti l'array, per cui la sua temperatura aumenta notevolmente rispetto alle altre celle e condiziona la produzione di energia elettrica dell'intero array.

### 3.2 Stringhe di celle, array, non funzionanti

Quando uno dei diodi presenti nella scatola di giunzione si guasta, generando il passaggio di corrente inversa, le celle ad esso connesse si surriscaldano, tale difetto è visibile con una termocamera, un terzo esatto del modulo di surriscalderà rispetto agli altri array. Questo problema causa il danneggiamento della scatola di giunzione e il surriscaldamento delle celle connesse in parallelo a tale diodo con il loro progressivo degrado.

### 3.3 Cedimento, rottura del telaio del modulo

Difetto riscontrabile a livello visivo, dovuto a cattiva installazione, sollecitazioni meccaniche dovute agli agenti atmosferici o stress termici elevati.

### 3.4 Bave di lumaca e micro fratture

Si tratta di microfratture della cella che, nel migliore dei casi, provoca un surriscal-

damento localizzato della cella, con progressivo deterioramento, in casi peggiori, il surriscaldamento localizzato è talmente elevato che nel tempo porta alla perdita di isolamento e degrado della prestazione del modulo.

### 3.5 Stringhe di moduli non funzionanti

Quando si presenta il caso che uno o più moduli, o addirittura una intera stringa, non sono collegati correttamente all'impianto. In tal caso l'energia prodotta dagli stessi non può fluire attraverso l'impianto e quindi si converte in calore e l'intero pannello/stringa si scalda rispetto a quelli collegati correttamente.

### 3.6 Delaminazione

La delaminazione rappresenta un distacco, spesso parziale, dell'incapsulante dal vetro o dal backsheet del modulo.

### 3.7 Effetto PID

L'effetto PID (Potential Induced Degradation) si presenta quando una cella fotovoltaica accumula cariche superficiali che, attraverso il cattivo isolamento, tendono a fluire verso *terra* attraverso la cornice metallica che appunto collegata a *terra*. Può causare perdite di efficienza fino al 70%.

## 4. Alcuni esempi

Parti del modulo fotovoltaico sono più calde di altre, quindi, a seconda della forma e della posizione, queste zone/punti caldi si riconducono a diversi tipi di guasto.

Ad esempio, aree più calde perfettamente geometriche, evidenziano celle difettose che non stanno funzionando bene e sulle quali si riversa parte della energia elettrica prodotta dalle altre celle del modulo.

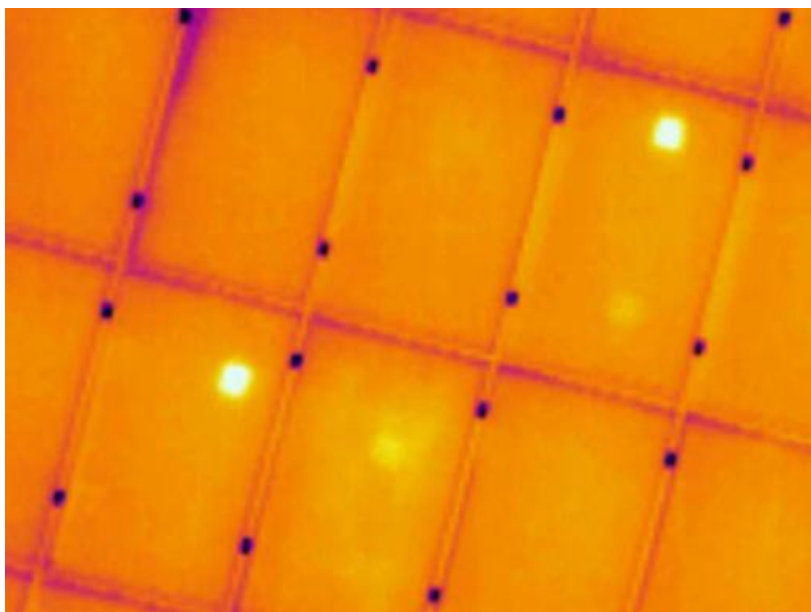


Figura 2 - Moduli fotovoltaici con anomalie termiche Hot-spot.

Se si verifica che celle o stringhe di celle, appaiono più calde o in una configurazione patchwork, probabilmente il guasto è dovuto al malfunzionamento dei diodi di bypass oppure a cortocircuiti interni o a disaccoppiamento di celle.

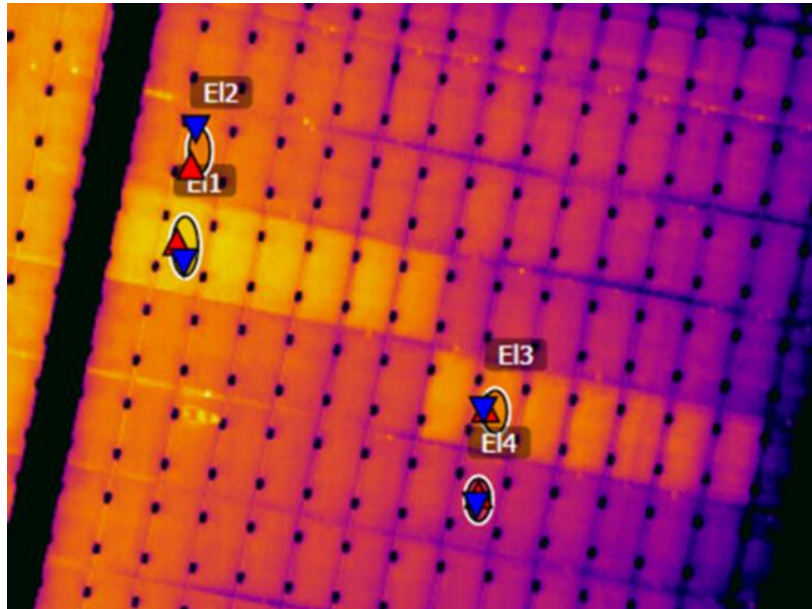


Figura 3 - Modulo fotovoltaico con diverse celle surriscaldate.

Se poi abbiamo dei problemi di connessione elettrica tra i moduli, troveremo degli interi moduli più caldi degli altri.

Esiste, come detto, la IEC TS 62446-3 che stabilisce dei valori e/o delle linee guida per interpretare le anomalie termiche rilevate su un modulo fotovoltaico.

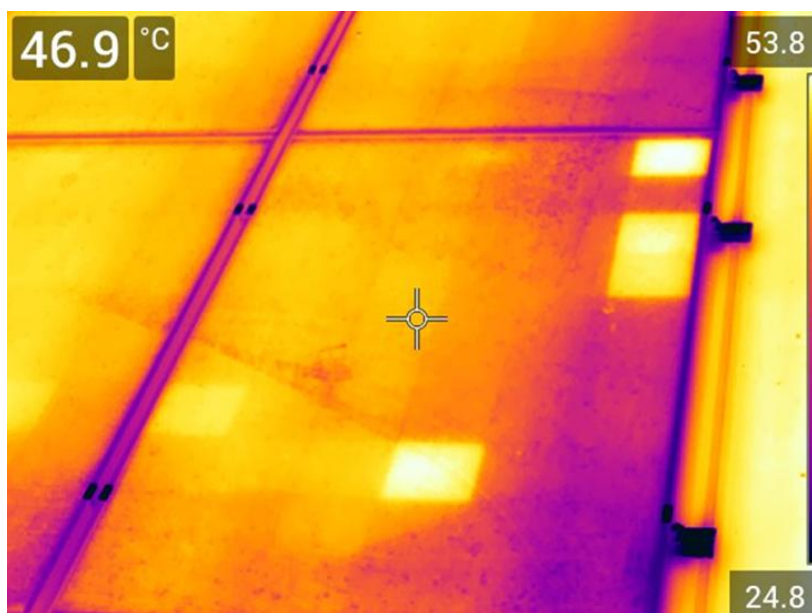


Figura 4 - Stringhe di moduli con difetti di collegamento.

Tuttavia, quello che si fa è confrontare la temperatura della anomalia termica individuata con la temperatura media del modulo stesso o di quella dei moduli adiacenti, oppure con la TCN (temperatura di normale operatività del modulo) quindi la NOCT rapportata alle condizioni operative.

In questo esempio, nell'immagine grande si possono osservare due diverse anomalie termiche, stringhe di moduli a temperature più elevate dei moduli circostanti, probabilmente ci sono problemi di connessione e un modulo difettoso di cui si vede, in una foto reale, quale è l'origine del difetto.

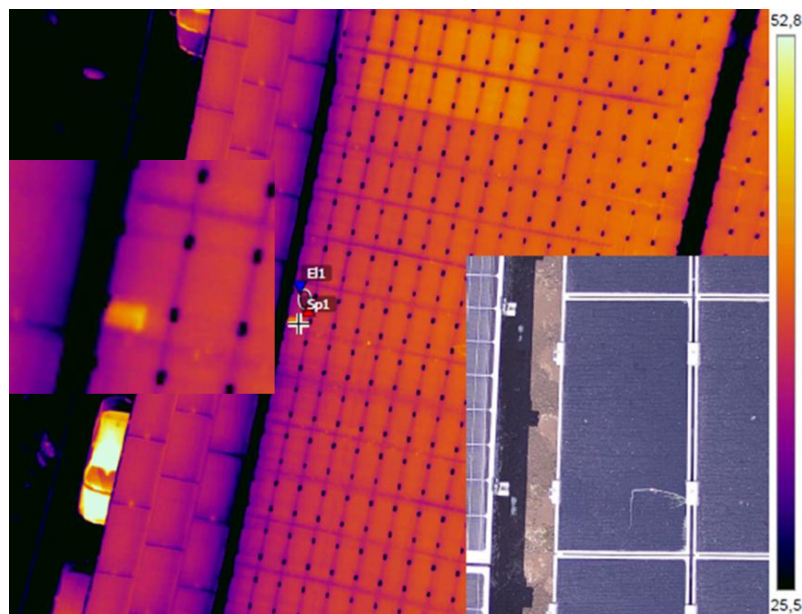


Figura 5 - modulo che presenta una anomalia termica che, come si vede nell'immagine RGB, è generata dalla rottura del modulo

### 5. Quali vantaggi abbiamo rispetto ad un rilievo con termocamera palmare

Possiamo riassumere così i principali vantaggi:

- **Rapidità:** il drone impiega il minor tempo rispetto a qualsiasi altro tipo di strumentazione utilizzata per operazioni di termografia.
- **Versatilità:** il drone per effettuare indagini termografiche può essere utilizzato in ambiti diversi continuando a garantire un'alta sicurezza ed affidabilità.
- **Qualità delle immagini** e completezza dei risultati.
- **Costi ridotti:** La riduzione dei tempi di rilievo di grossi campi fotovoltaici, spesso ridotta ad un giorno, riduce drasticamente i tempi di rilievo con termocamera portatile a mano.

Grazie ai droni è possibile raggiungere luoghi che in passato sarebbe stato impossibile mappare, sia per l'alto fattore rischio sia per gli ingenti costi di noleggio di piattaforme aeree o elicotteri.

Nelle figure di seguito è riportato un esempio, in cui si vede lo stesso difetto, di una cella fotovoltaica, rilevato con drone da circa 30m di altezza (foto a sinistra, sp1 31,2 °C) e invece con una termocamera palmare, a pochi metri (foto a destra sp1 31,3 °C). Si può apprezzare, al di là di ragionevoli approssimazioni, la efficacia del rilievo termografico aereo.

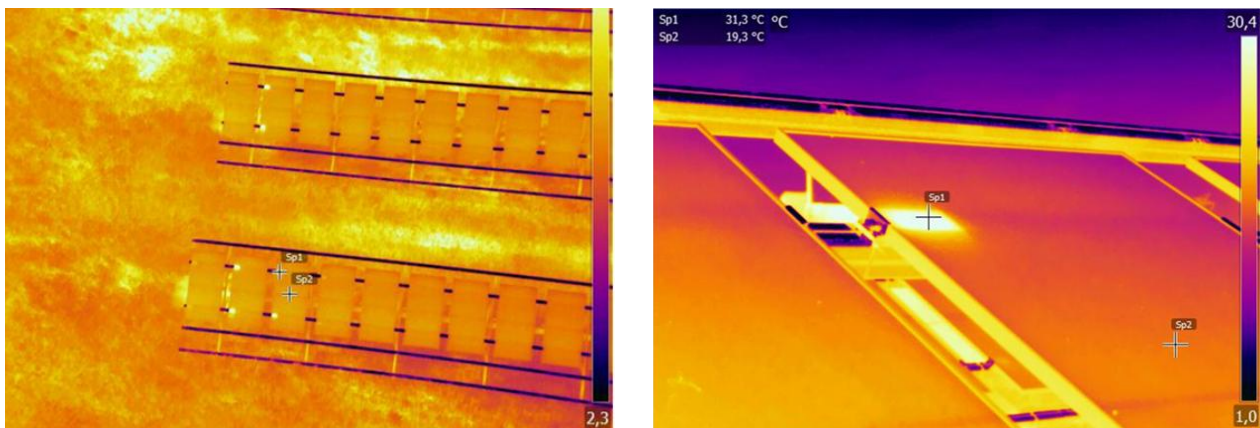


Figura 6 - Due immagini della stessa anomalia termica di un modulo fotovoltaico, vista con drone, equipaggiato con termocamera, a 30 metri di altezza e da vicino con termocamera portatile.

## 6. L'indagine termografica

La termografia aerea non è come riprendere con una termocamera palmare a terra, alla competenza termografica vanno aggiunte, tecniche di volo e di ripresa aerea molto complesse.

Con un drone in volo, per rilevare la temperatura in remoto, si deve tenere conto dei fattori ambientali, atmosferici, dei limiti tecnologici e delle proprietà specifiche della termocamera che si utilizza combinata al drone.

Per un corretto rilievo termografico dei moduli fotovoltaici è necessario che ci sia un certo contrasto termico per meglio identificare i difetti.

Quindi, come per gli impianti elettrici si consiglia che l'impianto elettrico sia al 50-60% del carico elettrico, così i pannelli fotovoltaici devono essere sottoposti ad una radiazione solare almeno di 600 W/mq, misurabile con un pireliometro.

Temperature dell'aria basse evidenziano maggiormente i contrasti termici, per cui preferibilmente si effettuerà il rilievo in mattinata.

Anche le giornate ventose vanno evitate per evitare raffreddamenti localizzati per convezione.

Altra particolarità del rilievo termografico sui pannelli fotovoltaici è dovuta al fatto che, l'intero campo fotovoltaico, si presenta come una grande superficie di vetro che riflette tutto quanto c'è intorno e soprattutto il cielo e quindi le nuvole.

L'angolo alfa, di ripresa, come suggerito dalla IEC TS 62446-3, dovrà essere almeno di 30°. Per cui il rilievo va fatto con una termocamera con una alta sensibilità stando molto attenti all'angolo di rilievo, ripetendo i rilievi dei casi sospetti da più angolazioni e,

quando è possibile, per un approfondimento e verifica ulteriore, effettuare il rilievo termografico dalla parte posteriore del modulo fotovoltaico.

L'ideale è avere un IFOV tale da coprire la singola cella FV con 5x5 pixel.

La misura della temperatura di un oggetto con un sensore a infrarossi è indicativa della temperatura superficiale. Tuttavia, in funzione delle loro caratteristiche, non tutti i materiali rendono la misura della temperatura superficiale facile, ciò dipende dall'Emissività e dalla Riflettanza dell'oggetto.

Senza andare nel dettaglio di come questi parametri variano in funzione di diversi fattori (composizione, superficie, colore e la temperatura stessa), si può considerare che l'Emissività del modulo fotovoltaico è assimilabile a quella del vetro 0,85-0,90 (per radiazioni tra 8 e 14micron) e per avere un giusto compromesso per attenuare i fenomeni di emissività riflettanza, utilizzare un angolo di osservazione, rispetto alla perpendicolare al modulo, che va dai 15° ai 60°.

Ad influenzare l'accuratezza e la corretta immagine infrarossa, oltre alle proprietà dell'oggetto di indagine, ci sono anche le condizioni atmosferiche, cielo sereno, nuvoloso, variabile, e l'aria che si interpone tra la termocamera e l'oggetto di indagine, densità dell'aria, umidità relativa, polvere, inquinamento.

Chiaramente, maggiore è la distanza tra il drone e l'oggetto di indagine, a parità di condizioni, meno accurate saranno le misure termiche.

In generale, polvere, vento, pioggia, fumo e neve riducono la trasmissione di radiazioni infrarosse e influenzano i rilievi.

### **7. Controllo ai fini del rispetto delle prescrizioni antincendio dei VVF**

Incendi, che si associano ad impianti fotovoltaici realizzati sulle coperture di fabbricati, sono stati riscontrati in diversi casi nel nostro Paese.

Su edifici dove si svolgono attività soggette al controllo dei Vigili del Fuoco secondo il D.P.R. 1 agosto 2011, n. 151, l'impianto fotovoltaico può costituire un aggravio del rischio di incendio.

È importante quindi controllare se è stato realizzato a regola d'arte ed eseguire regolarmente la manutenzione, ivi compreso un controllo termografico del campo fotovoltaico.

In particolare, nel nostro caso possiamo verificare:

- a. Se tutti i moduli fotovoltaici sono installati sulle strutture ed elementi di copertura e/o di facciata che siano stati identificati come incombustibili (Classe 0 secondo il DM 26/06/1984 oppure Classe A1 secondo il DM 10/03/2005) o, in alternativa, siano stati installati con l'interposizione tra gli stessi e il piano di appoggio, di uno strato di materiale, che sia stato identificato come di resistenza al fuoco almeno EI 30 ed incombustibile (Classe 0 secondo il DM 26/06/1984 oppure Classe A1 secondo il DM 10/03/2005).
- b. Se i moduli fotovoltaici e le condutture elettriche installati, consentono il corretto funzionamento e la manutenzione di eventuali evacuatori di fumo e di calore presenti; si dovrà verificare quindi che i moduli, le condutture, gli inverter, i quadri ed altri eventuali apparati non sono installati nel raggio di 1 m dagli evacuatori di fumo e di calore. (lucernari, camini, ecc.);

- c. Se ci sono livelli di temperatura anomali dei pannelli fotovoltaici e dei cavi e connessioni; la temperatura massima che un pannello fotovoltaico può sopportare è una caratteristica del pannello stesso, in ogni caso, per esperienza, è consigliabile non superare i 90°C, pena danni permanenti ai materiali e alle connessioni, riduzione della durata del modulo e aumento dei costi di manutenzione dell'impianto fotovoltaico.
- d. Condizioni di accesso all'impianto, linea vita se su superficie elevata.

## **5. Conclusioni**

L'ispezione termografica, di impianti fotovoltaici, con l'ausilio di droni, consente di individuare velocemente problemi del campo fotovoltaico e anche difetti che invece possono portare, col tempo, a problemi più seri.

Certamente richiede molta formazione ed esperienza, ma è diventato uno strumento di indagine imprescindibile, sia in fase di collaudo finale, dopo l'installazione del campo fotovoltaico, sia per il monitoraggio periodico delle condizioni dello stesso.

L'ispezione in poche ore garantisce inoltre, con una certa tolleranza, l'esame dei moduli alle stesse condizioni atmosferiche e di irraggiamento solare, particolare di non poco conto per una corretta analisi termica ed elettrica.

Osservando le opportune condizioni e procedure di cui si è parlato, si può arrivare in tempi ragionevoli ad un report termografico dettagliato e con l'ausilio di software specifici si ottengono delle ortofoto reali ed ortofoto termiche che sono di immediato impatto per la comprensione dello stato del campo fotovoltaico.

## BIBLIOGRAFIA

- Vollmer, M., & Mollmann, K.-P. (Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications). Wiley-VCH, 2018
- Lucchi, E. (Diagnosi energetica strumentale degli edifici: Termografia e analisi non distruttive - Normativa e procedure operative). Dario Flaccovio Editore, 2014
- Roche, G. (La termografia per l'edilizia e l'industria. Manuale operativo per le verifiche termografiche). Maggioli Editore, 2011
- Lanzoni, D. (Diagnosi e certificazione energetica: prove strumentali sugli edifici). Maggioli Editore, 2012
- Termografia. Le applicazioni sugli impianti elettrici ed industriali (Collana Maggioli Editore)
- Montagna, F. (Termografia edile. Con 30 schede di ispezioni termografiche svolte). Maggioli Editore
- Ludwig, N., Luzi, F., Ricca, R. (La Termografia. Teoria e applicazioni). Point Veterinaire Italie
- Lanzoni, D. (Termografia). Maggioli Editore



## DRONI PER LA SICUREZZA: LA RICERCA INAIL PER LA GESTIONE "SICURA" DEI DISASTRI NATECH NEGLI IMPIANTI INDUSTRIALI PIR

A. Marino, M. Ciucci – Inail, Dit

### ABSTRACT

L'impatto di un disastro naturale su un impianto di stoccaggio o lavorazione di sostanze pericolose può provocare il rilascio di materiali pericolosi con possibili gravi conseguenze al di fuori del sito attraverso scenari di rilascio di sostanze tossiche, incendi o esplosioni. La normativa dell'UE, in particolare la Direttiva 2012/18/UE, tra i suoi nuovi elementi richiede esplicitamente l'analisi dei pericoli NaTech (Natural Hazard Triggering Technological Disasters). Il problema principale relativo agli incidenti NaTech è il verificarsi simultaneo di un disastro naturale (ad esempio terremoti, inondazioni e frane) e di un incidente tecnologico, entrambi i quali richiedono sforzi di risposta simultanei in una situazione in cui è probabile che le utilities necessarie per la mitigazione dei disastri non siano disponibili. Inoltre, i rilasci di materiali pericolosi possono essere provocati da una o più fonti in un impianto o contemporaneamente da più impianti pericolosi nell'area di impatto del disastro naturale, il che richiede il dirottamento delle risorse di gestione delle emergenze occupate a rispondere al disastro naturale. In questo articolo viene proposta e valutata l'applicazione di sistemi UAV dedicati per la gestione delle emergenze di incidenti NaTech. Il drone anticollisione è progettato per l'ispezione e l'esplorazione dei luoghi più inaccessibili, consentendo di volare in spazi complessi, ingombri o interni. Consentendo l'ispezione visiva remota in qualsiasi ambiente interno complesso e spazi confinati, evita la necessità per i lavoratori di entrare in luoghi pericolosi o affrontare situazioni pericolose evitando allo stesso tempo il rischio di collisioni e infortuni. Il drone è dotato di un telaio protettivo in fibra di carbonio resistente alle collisioni. Il carico utile integrato è rappresentato dalla registrazione simultanea di immagini Full HD e termiche e dall'angolo di inclinazione regolabile con led per la navigazione e l'ispezione in luoghi bui. Le connessioni veloci e l'elaborazione dei dati consentono l'elaborazione e la gestione dei dati in tempo reale della situazione. Questa metodologia rappresenta un approccio efficace alla gestione dei disastri NaTech e alla valutazione delle conseguenze.

*Keywords:* NaTech, UAV, Impianto industriale PIR, Gestione delle emergenze.

### 1. Introduzione

Gli impianti che superano una determinata soglia di quantità di sostanze pericolose, presenti all'interno del sistema, sono definiti con pericolo di incidente rilevante (PIR) ai sensi della Direttiva 2012/18/UE. La stessa direttiva definisce un incidente grave come: "un evento come una grande emissione, un incendio o un'esplosione, dovuti a sviluppi incontrollati, che si verificano durante l'attività di un impianto soggetto al presente decreto e che dà luogo a un pericolo grave, immediato o differito per la salute umana o per l'ambiente, all'interno o all'esterno dell'impianto, a seguito di una o più sostanze pericolose".

Dalla descrizione di cui sopra, gli eventi nocivi sono emissioni, incendi o esplosioni, che determinano lo stato di emergenza per l'area circostante il punto di rilascio. A questi eventi dannosi si aggiungono gli incidenti catastrofici naturali, vale a dire eventi non imputabili all'azione umana, come frane, terremoti ed eventi idrogeologici. I recenti grandi disastri naturali hanno evidenziato l'emergere di un nuovo tipo di rischio che si manifesta quando il mondo naturale e quello tecnologico si scontrano. L'impatto di un disastro naturale su un impianto di stoccaggio o lavorazione di sostanze pericolose può provocare il rilascio di materiali pericolosi con possibili gravi conseguenze al di fuori del sito attraverso scenari di rilascio di sostanze tossiche, incendi o esplosioni. Gli incidenti causati da un pericolo naturale o da un disastro che provocano il rilascio di materiali pericolosi sono comunemente indicati come incidenti NaTech (Natural Hazard Triggering Technological Disasters). Ciò include i rilasci da impianti chimici fissi e le fuoriuscite da oleodotti e gasdotti. Nonostante un crescente numero di ricerche e normative più severe per la progettazione e il funzionamento delle attività industriali, gli incidenti NaTech rimangono una minaccia. La Direttiva 2012/18/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 4 luglio 2012, sul controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose, recepita dagli Stati membri, riconosce l'importanza di NATECH. Per quanto riguarda l'identificazione e i metodi di prevenzione dei rischi accidentali, è richiesta una descrizione dettagliata dei possibili scenari di incidente rilevante e della loro probabilità o delle condizioni in cui si verificano, compresa una sintesi degli eventi, che possono svolgere un ruolo nell'innescare ciascuno di questi scenari, le cui cause sono interne o esterne all'installazione; tra cui, in particolare: cause naturali, ad esempio terremoti o inondazioni. È anche evidente, a causa dell'impatto del NaTech sugli scenari di incidenti rilevanti, la rilevanza del problema nell'informazione al pubblico; nella valutazione dell'effetto domino e nella pianificazione territoriale e nella gestione delle emergenze. La gestione del rischio NaTech, e in particolare la gestione delle emergenze, deve basarsi sulla disponibilità di dati affidabili e di informazioni tempestive. L'obiettivo di questa ricerca è quello di proporre e valutare l'applicazione degli UAS per la gestione dell'emergenza incidente NaTech e la valutazione delle conseguenze (valutazione dei danni). Sebbene l'uso di UAV per l'ispezione visiva degli impianti industriali sia un approccio diffuso, c'è ancora bisogno di ricerca sull'applicazione di questi strumenti nella gestione degli incidenti che si sviluppano in ambienti industriali complessi, confinati e semiconfinati. La proposta prevede l'utilizzo di UAS (Unmanned Aerial System), dotati di opportuni sensori, per volare. L'utilizzo di questi mezzi consente di ridurre drasticamente il rischio ascrivibile all'impiego di operatori umani durante il campionamento, il monitoraggio e la gestione degli eventi di emergenza in corso. Questo approccio fornisce informazioni affidabili e puntuali sull'evento in corso, evitando per quanto possibile perdite umane o lesioni.

## **2. Rischio NaTech**

Il rischio industriale, dal punto di vista della classificazione del rischio, può essere considerato come parte dell'ampia categoria dei pericoli di origine umana. I pericoli antropici, con alcune variazioni a seconda delle diverse classificazioni, comprendono: i pericoli tecnologici, il rischio nucleare, il rischio dei trasporti e altre attività antropiche come la

gestione delle imprese, delle infrastrutture e delle reti tecnologiche, che possono essere fonte di pericolo per l'uomo e l'ambiente; Nella prospettiva dei pericoli antropici il rischio ambientale è correlato alla probabilità di un evento causato da alterazioni inattese di parametri fisici e chimici nell'ambiente (acqua, aria e/o suolo), che abbiano effetti immediati, a breve o a lungo termine sulla salute della popolazione residente e dei lavoratori. Un'altra definizione, utilizzata nei documenti tecnici, evidenzia la differenza tra "disastro causato dall'uomo" che è causato direttamente dalle attività umane e "disastro indotto dall'uomo", disastro naturale che è accelerato/aggravato dall'influenza umana. In questo quadro eterogeneo di pericoli, rischi ed eventi, è noto che alcuni incidenti industriali significativi sono causati o innescati da calamità naturali.

Nella letteratura internazionale, questo tipo di incidente è definito come NaTech o evento "Naturale-Tecnologico". Una delle definizioni NaTech recita così: "Incidenti tecnologici, come incendi, esplosioni e rilasci tossici che possono verificarsi nei complessi industriali e lungo la rete di distribuzione a seguito di calamità naturali di matrice naturale".

### **3. Gestione del rischio NaTech e gestione delle emergenze**

La gestione del rischio è un'attività complessa che richiede un approccio multidisciplinare. Il NaTech Risk Management può essere suddiviso in varie fasi: prevenzione e preparazione (prima che la catastrofe colpisca); risposta e mitigazione (durante l'evento); valutazione delle conseguenze e valutazione dei danni (il prima possibile dopo l'evento); recupero e ricostruzione (che si verificano dopo il disastro). La fase di prevenzione consiste in tutte le azioni necessarie per ridurre l'impatto di futuri disastri. Può essere suddiviso in misure strutturali (soluzioni tecniche e strutturali) e non strutturali, come la pianificazione territoriale, la misura legislativa e la pianificazione di emergenza. La fase di preparazione comprende le azioni intraprese per ridurre gli impatti quando il disastro è previsto (se possibile) o imminente. La risposta e la mitigazione riguardano le azioni intraprese durante e immediatamente dopo il disastro, con l'obiettivo principale di salvare e salvaguardare vite umane e danni ambientali. Con il termine recupero si intende il processo di ripristino dei servizi e di riparazione dei danni dopo che il disastro ha colpito che segue ovviamente la fase di valutazione delle conseguenze e di valutazione dei danni. La gestione dell'emergenza richiede che le condizioni locali e le caratteristiche geografiche del luogo siano adeguatamente considerate, soprattutto in termini di pericolosità. Inoltre, gli eventi di crisi sono spesso caratterizzati da rapide dinamiche evolutive, con scenari che spesso possono cambiare in modo significativo in tempi brevissimi. Pertanto, una migliore gestione delle emergenze passa necessariamente attraverso la qualità e la quantità delle osservazioni e delle informazioni, nonché la velocità con cui le informazioni possono essere trasferite e rese chiare e fruibili dai decisori.

Uno dei principali problemi degli incidenti NaTech è il verificarsi simultaneo di un disastro naturale e di un incidente tecnologico, che richiedono entrambi sforzi di risposta simultanei in una situazione in cui è probabile che le linee di vita e i sistemi di mitigazione necessari per la risposta ai disastri non siano disponibili, in quanto potrebbero essere stati abbattuti dal disastro naturale. Inoltre, i rilasci di materiali pericolosi possono

essere provocati da una o più fonti in un impianto o contemporaneamente da più impianti pericolosi nell'area di impatto del disastro naturale, il che richiede il dirottamento delle risorse di gestione delle emergenze occupate a rispondere al disastro naturale.

#### **4. Metodologia**

La possibilità di monitorare da remoto un grande evento con analisi a spettro multiplo dimostra il potenziale dei sistemi aerei. La strumentazione di bordo permette inoltre di georeferenziare con precisione decimale il punto visualizzato per mostrare l'incidente maggiore istante per istante. La visione continua, ad esempio, di un incendio con una termocamera consente di analizzarne il movimento nel tempo. Pertanto, il possibile sviluppo futuro dell'incendio può essere previsto e contenuto. Un controllo simile può essere sviluppato durante gli incidenti che coinvolgono le piante, per prevedere i possibili effetti domino che possono verificarsi tra e tra le piante. L'individuazione delle zone più calde dell'apparecchiatura, che possono essere coinvolte in un incendio, consente di utilizzare manovre preventive, quali meccanismi di raffreddamento dell'area interessata, ove presenti. La gamma di sensori installabili a bordo dell'imbarcazione comprende anche rilevatori di gas. Questo permette di identificare la concentrazione di quello specifico gas in un punto dello spazio che, grazie al GPS di bordo, è georeferenziato. Una serie di campioni dei dati di concentrazione consente di valutare lo spazio e/o la nuvola nel tempo. I dati ottenuti in caso di rilascio continuo possono essere utilizzati per ottenere una mappa della nuvola e per identificare l'area di rilascio, utilizzando eventuali algoritmi specifici. In caso di rilascio istantaneo, invece, ci permette di individuare la direzione del trend del picco massimo e la sua diffusione nel tempo.

#### **5. Monitoraggio con UAS**

La proposta utilizza UAS (Unmanned Aerial Systems), dotati di opportuni sensori, per volare nell'area degli impianti e per dare la possibilità di gestire incidenti rilevanti e identificare le aree di rilascio. La comunicazione continua dei dati raccolti e la loro rielaborazione presso la stazione di controllo a terra consentono di intraprendere azioni specifiche e mirate per ridurre o addirittura annullare gli effetti secondari indesiderati (Giovani et al. 2017). L'utilizzo di questi mezzi consente di eliminare il rischio ascrivibile all'impiego di operatori umani sia in fase di campionamento per evidenziare anomalie sia per gestire eventi emergenziali in corso. Anche se gli operatori sono in possesso di allarmi portatili, la loro scarsa conoscenza della sostanza potrebbe aumentare drasticamente la possibilità di causare lesioni ai lavoratori. La caratteristica principale è la possibilità di monitorare regolarmente le aree di interesse, che sono a maggior rischio di entrare in contatto con le sostanze oggetto di analisi. Questo utilizzo consente di identificare eventi (rilasci) che potrebbero non essere identificati dai normali sistemi di monitoraggio e, soprattutto, consente di intervenire rapidamente prima che la diffusione delle sostanze provochi danni maggiori e imprevedibili. La capacità del veicolo di volare all'interno e all'esterno degli edifici consente di analizzare in dettaglio l'entità del rilascio. Il ritardo nell'identificazione dell'evento può causare la diffusione dell'agente tossico e aumentare l'area del danno.



Figura 1. Mini droni dotati di gabbia protettiva



Figura 2. Drone resistente alle collisioni

## 6. *Approccio alla gestione delle emergenze*

La gestione dell'emergenza dovrebbe seguire un approccio strutturato: subito dopo l'incidente NaTech, uno "sciame" di mini droni programmabili dotati di telecamere HD dovrebbe accedere all'area dell'incidente grave al fine di fornire una prima valutazione visiva in tempo reale della situazione. Dopo la prima valutazione dovrebbero intervenire due diversi tipi di droni: Nelle aree interne, confinate e semiconfinate, il drone deve essere resistente alle collisioni per un'accessibilità sicura agli spazi confinati e caratterizzato da carico utile antiurto, stabilizzazione senza GPS, blocco della distanza, streaming live Full HD di telecamera e telecamera termica, illuminazione obliqua regolabile, antipolvere. Questo drone potrebbe eventualmente essere dotato di un sensore specifico per identificare le perdite di sostanze pericolose. In altre aree all'aperto ma strutturalmente complesse, il drone dovrebbe essere specificamente dedicato a missioni critiche con tempo di volo prolungato e dotato di rilevamento degli ostacoli che fornisce immagini visibili e termiche in tempo reale di siti, strutture e infrastrutture specifiche e, infine, dell'intera area.

## 7. *Applicazioni*

### 7.1. *Gestione delle emergenze NaTech*

Sono state identificate alcune delle principali applicazioni degli UAS alla gestione dell'emergenza Incidenti NaTech:

- ricerca di sopravvissuti;
- rilevamento e monitoraggio di esplosioni e incendi;
- rilevamento e monitoraggio dei rilasci di sostanze tossiche e/o infiammabili nell'aria.

I sensori necessari per identificare le persone e gli animali tra i detriti sono le telecamere visibili e termiche. L'analisi dello spettro visibile aiuta ad individuare l'eventuale presenza di movimento da parte di creature viventi con visione diretta e successiva rielaborazione dei dati. La capacità di ricostruire fotograficamente può essere utilizzata per mostrare l'area danneggiata in tre. L'utilizzo della termocamera, invece, permette di individuare eventuali anomalie termiche che sono le persone intrappolate sotto le macerie. Il metodo progettato prevede il volo del drone con una registrazione sia nello spettro visibile che in quello termico, più la trasmissione video delle immagini scattate al fine di condurre un primo sopralluogo, rapido, in loco. Produce le coordinate GPS come output per consentire un'indagine localizzata dell'area. La georeferenziazione è possibile grazie alla conoscenza delle coordinate geografiche del drone e all'utilizzo di algoritmi che lavorano sui pixel delle immagini. Inoltre, il software rielabora il video radiometrico dalla termocamera, per evidenziare e georeferenziare le sezioni con variazioni termiche. Applicando il software e l'hardware, l'area può essere sondata e analizzata in sicurezza per identificare la possibile posizione di eventuali persone scomparse. Per quanto riguarda il rilevamento e il monitoraggio di esplosioni e incendi, il payload UAS sarà costituito da una telecamera termica affiancata da una telecamera visibile, per fornire una visione delle temperature nelle aree adiacenti all'incendio (essenziale per l'identificazione di possibili effetti domino) e fornire una ripresa visiva fianco a fianco della stessa area. I dati misurati vengono registrati e inviati all'operatore, che analizza in tempo reale i dati monitorati dal sistema. Il software da abbinare a questo hardware consente un'identificazione un po' approssimativa dello sviluppo man mano che l'evento si svolge, per consentire un futuro intervento mirato. Il volo è centrato sull'area di interesse in modo da fotografare l'area coinvolta nell'incendio il più vicino possibile. L'immagine visibile permette immediatamente di monitorare le apparecchiature coinvolte dall'evento, insieme alle apparecchiature che possono essere coinvolte in un effetto domino. Grazie alla vista dalla termocamera, lo studio della temperatura superficiale delle attrezzature coinvolte nell'incendio e la conoscenza del materiale di costruzione consentono di calcolare il tempo che trascorrerà prima del collasso strutturale delle apparecchiature. Il software di gestione in questo caso individua la conformazione georeferenziata delle fiamme che, sovrapposta ad una mappa dell'impianto, permette di identificare le apparecchiature adiacenti a rischio. La visione con termocamera permette di identificare la temperatura degli hotspot dell'apparecchiatura e, grazie ad algoritmi strutturali all'interno del software, di determinare il tempo necessario per collassare.

Infine, per quanto riguarda il rilascio di sostanze tossiche/infiammabili nell'aria, l'UAS permetterà di avvicinarsi ai punti di rilascio all'interno degli impianti. I sensori a bordo: telecamera di visione, telecamera termica e rilevatori di gas o nasi elettronici, consentiranno di identificare le sostanze e la concentrazione presenti in quello spazio. Nella maggior parte dei casi, la concentrazione della nube è tale da non permettere di vedere il gas (a meno che il gas non sia colorato), rendendo difficile l'identificazione visiva. Durante il volo, i dati registrati dalla termocamera, dalla telecamera di visione e dai rilevatori verranno trasmessi allo schermo GCS per consentire una rapida identificazione da parte dell'operatore.

## 7.2. Gestione delle emergenze NaTech

Lo stesso UAS o un UAS ad ala fissa può essere utilizzato per la valutazione delle conseguenze e la valutazione dei danni.

La qualità dell'acqua è uno dei principali fattori ambientali che determinano la salute umana. L'identificazione del rilascio di contaminanti o sostanze tossiche nell'acqua consente di evitare la diffusione dell'inquinante e di elaborare piani per limitare il possibile sviluppo dannoso per gli organismi terrestri o acquatici e per la vegetazione. L'utilizzo dell'UAS con i suoi specifici sensori consente di monitorare le raccolte superficiali e gli eventuali inquinanti disciolti attraverso il monitoraggio delle interazioni tra la sostanza tossica e la vegetazione.

Le bande riflesse che possono essere analizzate sono:

- blu (B): banda elettromagnetica all'interno dello spettro visibile, con picco massimo intorno ad una lunghezza d'onda pari a 470 nm. Viene utilizzato per riprese atmosferiche e per riprese in acque profonde;
- verde (G): banda elettromagnetica nello spettro visibile, con picco massimo intorno ad una lunghezza d'onda pari a 560 nm. Viene utilizzato per riprese di vegetazione e ambienti acquatici a media profondità;
- rosso (R): banda di radiazione elettromagnetica all'interno dello spettro visibile, con picco massimo alla lunghezza d'onda di 600 nm. Viene utilizzato per fotografare oggetti artificiali, acque poco profonde e alcuni tipi di vegetazione;
- red-edge (RE): banda di radiazione elettromagnetica posizionata attraverso lo spettro visibile e infrarosso. Il picco massimo è posto a 700 nm con una riduzione del 50% dell'intensità agli estremi dell'intervallo tra 680 e 730 nm;
- vicino all'Infrarosso (NR): esistono due bande elettromagnetiche che permettono di coprire l'area interna del NIR: la più vicina allo spettro visibile ha una lunghezza d'onda che rientra nell'intervallo compreso tra 700 e 830 nm, la banda più lontana ha una lunghezza d'onda con gli estremi dell'intervallo compresi tra 830 e 1000 nm, queste ultime sono dedicate al monitoraggio remoto degli ambienti naturali.

È necessario un sensore multispettrale. La combinazione algebrica dell'intensità di queste bande permette di creare specifici indici di identificazione delle sostanze anomale rispetto all'acqua e di identificare il livello di stress della vegetazione (es. NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) intorno alla sorgente acquatica. Il drone necessario per l'operazione deve proteggere la struttura dalla salsedine marina, che può essere spruzzata quando l'imbarcazione vola a livelli eccessivamente bassi. Il volo dell'UAS varia a seconda del tipo di acqua in esame: - nel caso di un fiume: l'imbarcazione lascia la foce e rivola a monte fino alla sorgente, in modo da individuare il punto più lontano dal rilascio; - nel caso di un lago: il volo è circolare per dare una visione globale dello specchio d'acqua; - nel caso di un'analisi della linea di costa: il volo si svolge parallelamente in entrambe le direzioni per individuare le aree di terra più vicine ad un possibile contatto con la sostanza; - in caso di mare aperto: il volo è circolare rispetto al punto di partenza e può essere calibrato in base a quanto viene individuato durante il volo effettivo. Questo permette di comprendere la complessità del software per gestire l'attività per fornire un utilizzo notevolmente flessibile.

I sensori a bordo forniscono continuamente dati che vengono raccolti per consentire all'operatore di effettuare un primo controllo visivo dello schermo. Il software per rielaborare i dati permette di identificare facilmente le sostanze anomale. Viene utilizzato per individuare anomalie anche estese e per predisporre un pronto intervento da parte delle autorità competenti per limitare la dispersione delle sostanze tossiche e limitare i relativi danni. D'altra parte, è difficile ispezionare le condotte sotterranee, poiché eventuali perdite non sono direttamente visibili. La fuoriuscita di idrocarburi o anche di sostanze tossiche/nocive può portare a danni plausibili agli obiettivi circostanti, come le persone e l'ambiente. Grazie ad opportuni sensori, i droni consentono l'identificazione non solo di pozze superficiali e terreni saturi, ma anche di infiltrazioni nel sottosuolo. L'analisi richiede la conoscenza di molteplici dati nello spettro visibile e infrarosso. Lo studio della radiazione riflessa in bande specifiche, analogamente a quelle menzionate nel capitolo precedente, permette di determinare le variazioni della continuità superficiale del suolo, permettendo così l'identificazione di pozze e terreni saturi. La riflettanza degli idrocarburi differisce in particolare nella banda NIR (Near InfraRed), che ne consente la rilevazione. L'identificazione di anomalie nel sottosuolo è possibile grazie alla misurazione della temperatura superficiale del terreno. I dati estratti dall'analisi delle bande consentono inoltre di stabilire lo stato di salute delle piante, in quanto si tratta di un possibile primo allarme di perdite sotterranee, poiché la sostanza danneggia la pianta. La strumentazione necessaria a bordo, quindi, è costituita da tre sensori: - telecamera; - fotocamera multispettrale; - Telecamera termica. Quest'ultimo identifica la temperatura superficiale degli oggetti in analisi interagendo con la radiazione nella regione IR ( $10\div 12\ \mu\text{m}$ ) emessa dall'oggetto. Il rilascio di sostanze calde o una temperatura superiore a quella del terreno sono quindi facilmente identificabili. Sfruttando le proprietà termiche delle diverse sostanze e le inerzie termiche che possono essere in gioco, è possibile identificare anche i rilasci sotterranei di fluidi freddi. I dati ottenuti dalle telecamere visibili vengono trasmessi continuamente su due schermi separati presso la stazione di controllo a terra dell'operatore (GCS) per consentire un controllo semplice e approssimativo. In presenza di qualsiasi anomalia, il software di postproduzione rielabora i dati provenienti dalle telecamere multispettrali e termiche, al fine di fornire informazioni georeferenziate della posizione della perdita e delle immagini relative all'area. Le uscite sono progettate per identificare facilmente l'eventuale perdita e per consentire ad un operatore specializzato di verificare la reale pericolosità dell'evento. Questo metodo consente di identificare rapidamente le perdite anche per aree che si estendono per centinaia di chilometri. La necessità di individuare rapidamente è legata alla necessità di limitare l'inquinamento del suolo circostante che, se localizzato in prossimità di una falda freatica sottostante, potrebbe portare ad una maggiore diffusione delle acque inquinate e ad un maggior numero di potenziali target.

## **8. Conclusioni**

La soluzione proposta consentirà di coprire un gran numero di situazioni di emergenza, in cui vi è un rischio considerevole per la salute umana e per l'ambiente circostante. L'interfaccia grafica consente l'interpretazione immediata dei dati. L'intervento immediato sul luogo dell'incidente richiede metodi efficaci di base. Le informazioni sull'even-

to potrebbero essere raccolte in tempo reale e consentono di risolvere il problema del tempo per consentire ai servizi di arrivare il prima possibile sul luogo dell'incidente. Questi sistemi ci permettono di controllare vaste aree senza la necessità di un intervento umano diretto e di ridurre il più possibile l'area di danno in caso di evento accidentale. Questo è il risultato di un mezzo con la capacità di volare nell'area dell'incidente e, allo stesso tempo, di fornire una visione molto dettagliata in certe bande precise di analisi spettrale della situazione che si trova ad affrontare l'UAS. L'applicazione di veicoli aerei senza pilota (UAV) è uno strumento efficace per la risposta e la gestione dei disastri. Inoltre, questo sistema evita il più possibile di utilizzare la vita umana, poiché questa non può essere sostituita in caso di incidente, a differenza degli UAS. Pertanto, questo metodo riduce al minimo il rischio per gli operatori.

## BIBLIOGRAFIA

- Ciucci, M., Marino, A., Paolacci, F., Bursi O.S., (2019), Integrated smart seismic risks management (2019) American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division PVP, ASME PVP 2019 Conference, Vol. 8, DOI: 10.1115/PVP2019-94027
- D'Amico M, Buratti N., (2019), Observational Seismic Fragility Curves for Steel Cylindrical Tanks. ASME. J. Pressure Vessel Technol. 141(1):010904-010904-14. doi:10.1115/1.4040137
- Directive 2012/18/EU (2015) concerning the control of the danger of major incidents connected to hazardous substances
- Di Franco S., Salvatori R. (2015). Current situation and needs in man-made and natech risks. *Remote Sensing Applications: Society and Environment I*, 72-84
- Giovani M., Ramalli G., Manning N. C., Manneschi M., (2017). Monitoring with drones during a major emergency. *AES Bioflux 9(1)*, 45-55
- Marino, A., Ciucci, M., Paolacci, F., (2017), Smart technologies for integrated natural risk management: Innovative methodologies and remote sensing (2017) American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division PVP, ASME PVP 2018 Conference, Vol. 8, DOI:10.1115/PVP2017-66198
- Ricci F., Yang M., Reniers G., Cozzani V., 2022, The Role of Emergency Response in Risk Management of Cascading Events Caused by Natech Accidents, *Chemical Engineering Transactions*, 91, 361-366

## IMPLEMENTAZIONE DELLA SALUTE E SICUREZZA SUL LAVORO IN SITI CONTAMINATI, INDUSTRIALI E IN AMBITO AGRICOLO PER MEZZO DI DRONI

A. Ledda - Inail

### PREMESSA

L'evoluzione tecnologica nel campo dei Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR) rappresenta una svolta paradigmatica nell'approccio alla sicurezza occupazionale, in termini di ausilio, offrendo soluzioni innovative per la gestione dei rischi nei luoghi di lavoro. Il Laboratorio VI del Dipartimento Innovazioni Tecnologiche dell'INAIL ha intrapreso un'attività di ricerca finalizzata all'implementazione di metodologie avanzate per la salvaguardia dei lavoratori in contesti operativi caratterizzati da elevati profili di rischio. L'obiettivo primario del progetto consiste nello sviluppo di un sistema integrato di monitoraggio ambientale e campionamento industriale che permetta di eliminare o quantomeno ridurre drasticamente l'esposizione dei lavoratori a condizioni potenzialmente pericolose, in aderenza con i principi fondamentali della normativa nazionale in materia di sicurezza sul lavoro.

La scelta strategica di dotarsi di un drone di grandi dimensioni risponde all'esigenza di disporre di una piattaforma tecnologica versatile e performante, capace di operare in scenari complessi e diversificati. Le caratteristiche tecniche di questo sistema, con un'apertura alare di circa 1,8 metri e una capacità di carico utile di circa 10 chilogrammi, consentono l'integrazione di strumentazione sofisticata e specializzata, rendendo possibile l'acquisizione di dati multidimensionali in tempo reale. L'autonomia operativa di circa 30 minuti, garantita da un sistema di batterie ad alta capacità, unitamente alla portata teorica del radiocomando di 20 chilometri, delinea un quadro operativo di notevole flessibilità, sebbene le limitazioni normative vigenti in Italia impongano il mantenimento del contatto visivo con il mezzo durante le operazioni di volo, salvo specifiche autorizzazioni per situazioni eccezionali.



Figura 1: fase sperimentale effettuata dal personale Inail

Il progetto di ricerca si articola attraverso lo sviluppo di protocolli operativi standardizzati che garantiscano omogeneità e riproducibilità nelle procedure di monitoraggio, indipendentemente dal contesto applicativo specifico. La configurazione modulare della piattaforma aerea permette l'adattamento dinamico della strumentazione in base alle esigenze operative, consentendo l'installazione simultanea o alternata di sensori termici, ottici, chimici e radiometrici. Questa flessibilità di configurazione rappresenta un elemento chiave per l'ottimizzazione delle missioni operative, permettendo di massimizzare l'efficacia del monitoraggio minimizzando i tempi di intervento e i costi operativi associati.

L'approccio metodologico adottato nel progetto prevede una fase iniziale di caratterizzazione del rischio attraverso l'acquisizione remota di dati ambientali, seguita da un'analisi integrata delle informazioni raccolte per la definizione di strategie di intervento mirate. Questo processo iterativo consente di ottimizzare progressivamente le procedure operative, affinando le tecniche di rilevamento e migliorando l'accuratezza delle valutazioni di rischio. La capacità di processare i dati sia in tempo reale che in fase di post-elaborazione rappresenta un valore aggiunto significativo, permettendo sia interventi immediati in situazioni critiche che analisi approfondite per la pianificazione di interventi strutturali.

### **1. Siti contaminati**

L'applicazione della tecnologia SAPR nel contesto dei siti contaminati su larga scala rappresenta uno degli ambiti più promettenti e tecnicamente sfidanti del progetto di ricerca. Le aree industriali dismesse, le raffinerie, i poli chimici e petrolchimici costituiscono scenari operativi caratterizzati da una complessità multidimensionale, dove la presenza di contaminanti può interessare simultaneamente diverse matrici ambientali, dal suolo alle acque sotterranee, dall'aria agli ecosistemi biologici. In questi contesti, l'impiego del drone equipaggiato con sensoristica avanzata permette di ottenere una mappatura

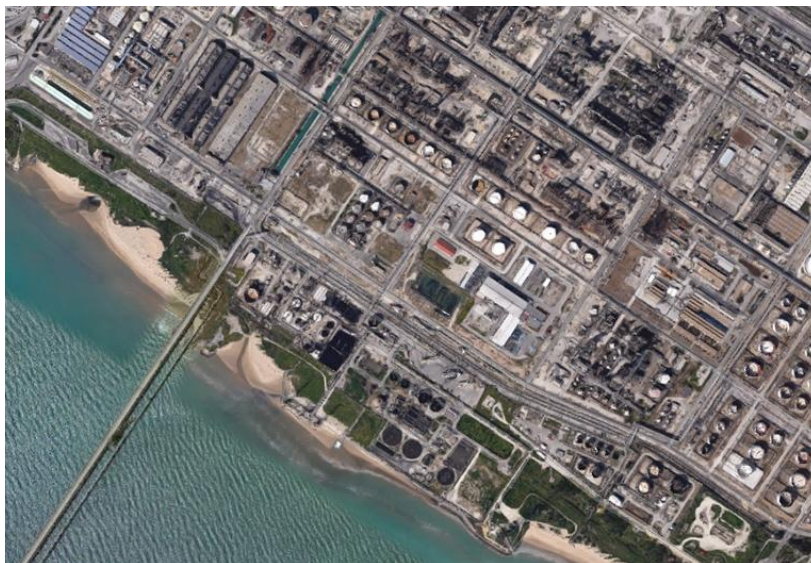


Figura 2: Ripresa aerea di un impianto petrolchimico

tridimensionale della contaminazione, integrando dati provenienti da diverse sorgenti informative in un modello unificato di valutazione del rischio.

La configurazione attuale del sistema prevede l'utilizzo sinergico di una termocamera ad alta risoluzione e di una fotocamera ottica di precisione, che operando in tandem forniscono una caratterizzazione preliminare estremamente dettagliata delle condizioni del sito. Le immagini termiche acquisite permettono l'identificazione di anomalie nel profilo termico del terreno che possono indicare la presenza di processi di decomposizione attivi, perdite da sistemi di stoccaggio sotterranei, o reazioni chimiche esotermiche in corso. Questi fenomeni, spesso non rilevabili attraverso l'ispezione visiva diretta, rappresentano indicatori cruciali per la valutazione della stabilità del sito e per l'identificazione di aree critiche che richiedono interventi prioritari. La capacità di rilevare gradienti termici anche minimi consente inoltre di identificare percorsi preferenziali di migrazione dei contaminanti, informazione essenziale per la progettazione di interventi di bonifica efficaci.

L'evoluzione prevista del sistema contempla l'integrazione di campionatori d'aria e sensori per composti organici volatili, che permetteranno di effettuare una caratterizzazione chimica dell'atmosfera sovrastante il sito contaminato. Questa capacità di monitoraggio atmosferico risulta particolarmente critica in presenza di contaminanti volatili o semi-volatili, che possono rappresentare una via di esposizione significativa per i lavoratori anche a distanze considerevoli dalla sorgente primaria di contaminazione. La possibilità di mappare in tempo reale la distribuzione spaziale delle concentrazioni di contaminanti aerodispersi consente di definire con precisione le aree di esclusione e di stabilire i requisiti minimi di protezione individuale per il personale che deve operare nel sito.

L'implementazione futura di una camera iperspettrale rappresenterà un salto qualitativo nelle capacità diagnostiche del sistema, permettendo l'identificazione diretta di specifici contaminanti sulla base delle loro firme spettrali caratteristiche. Questa tecnologia, operando su un ampio spettro di lunghezze d'onda che si estende dal visibile all'infrarosso, consente di discriminare tra diverse tipologie di contaminazione superficiale, identificare aree di stress nella vegetazione causate dall'assorbimento di sostanze tossiche, e mappare la distribuzione spaziale di specifici composti chimici. La capacità di effettuare questa caratterizzazione da remoto elimina completamente il rischio di esposizione diretta del personale durante le fasi preliminari di valutazione del sito, permettendo al contempo di acquisire informazioni con una risoluzione spaziale e temporale superiore a quella ottenibile con tecniche tradizionali di campionamento [1].

Il protocollo operativo sviluppato per l'impiego del drone in siti contaminati prevede una sequenza strutturata di operazioni che inizia con un volo ricognitivo per l'acquisizione di immagini ottiche ad alta risoluzione, seguito da passaggi mirati con sensoristica specializzata nelle aree identificate come critiche. I dati acquisiti vengono processati attraverso algoritmi di analisi spaziale che permettono la generazione di mappe tematiche di rischio, integrando informazioni multispettrali con modelli digitali del terreno e dati meteorologici.

Questo approccio integrato consente di ottimizzare le successive fasi di caratterizzazione diretta, concentrando gli sforzi di campionamento nelle aree a maggior rischio e riducendo significativamente i tempi e i costi associati alle attività di bonifica [2] [6].

## 2. *Discariche abusive*

Il fenomeno delle discariche abusive rappresenta una criticità ambientale e sanitaria di primaria importanza nel panorama nazionale, con implicazioni dirette sulla sicurezza dei lavoratori chiamati a operare in questi contesti. L'impiego della tecnologia SAPR in questo ambito specifico offre opportunità uniche per la caratterizzazione rapida e sicura di siti potenzialmente pericolosi, dove la natura e la composizione dei rifiuti depositati sono spesso sconosciute e possono includere materiali tossici, infiammabili o biologicamente attivi. La capacità del drone di effettuare rilevamenti aerei sistematici consente di ottenere una visione d'insieme della problematica, impossibile da conseguire attraverso ispezioni terrestri tradizionali, particolarmente in aree di difficile accesso o caratterizzate da instabilità strutturale.



Figura 3: ripresa aerea di una discarica

La configurazione sensoristica attualmente implementata sul drone permette di condurre analisi multidimensionali che integrano informazioni visive, termiche e potenzialmente chimiche. La fotocamera ad alta risoluzione consente di documentare con precisione l'estensione areale della discarica, la tipologia apparente dei materiali depositati e la presenza di eventuali fenomeni di dispersione ambientale. Attraverso tecniche di fotogrammetria aerea o l'impiego di un LiDAR è possibile ricostruire modelli tridimensionali accurati del cumulo di rifiuti, permettendo stime volumetriche precise essenziali per la pianificazione degli interventi di rimozione e per la quantificazione dei costi associati. La documentazione fotografica georeferenziata costituisce inoltre elemento probatorio fondamentale per le azioni legali contro i responsabili dello scarico abusivo [11] [12].

L'analisi termografica riveste un ruolo particolarmente critico nell'identificazione di processi degradativi attivi all'interno della massa di rifiuti. Le reazioni di decomposizione anaerobica, frequenti in discariche non controllate contenenti materiale organico, generano significativi incrementi di temperatura che possono essere rilevati attraverso la termocamera anche quando non visibili in superficie. Questi punti caldi rappresentano aree di particolare criticità, sia per il rischio di auto-combustione che per l'emissione di gas tossici o esplosivi come metano, idrogeno solforato e ammoniaca. La mappatura termica permette inoltre di identificare percorsi preferenziali di infiltrazione del percolato, informazione cruciale per valutare il rischio di contaminazione delle matrici ambientali circostanti e per progettare interventi di contenimento efficaci.

L'evoluzione prevista del sistema contempla l'integrazione di sensori specifici per la rilevazione di biogas e composti organici volatili, che permetteranno una caratterizzazione chimica diretta dell'atmosfera sovrastante la discarica. Questa capacità diagnostica risulta essenziale per la valutazione del rischio sanitario per i lavoratori e per la popolazione residente nelle vicinanze, consentendo di quantificare le emissioni di sostanze odorigene e potenzialmente tossiche. La possibilità di effettuare questi rilevamenti da remoto elimina la necessità di esporre il personale a condizioni potenzialmente pericolose durante le fasi iniziali di caratterizzazione del sito, permettendo al contempo di acquisire dati con continuità temporale per valutare l'evoluzione delle emissioni in funzione delle condizioni meteorologiche e stagionali [3].

L'implementazione di una camera iperspettrale consentirà, anche in questo ambito, in futuro di effettuare una caratterizzazione dettagliata della composizione superficiale dei rifiuti, discriminando tra diverse tipologie di materiali sulla base delle loro proprietà spettrali. Questa tecnologia permetterà di identificare la presenza di materiali pericolosi come amianto, di distinguere tra plastiche di diversa composizione per ottimizzare le strategie di recupero, e di mappare la distribuzione di contaminanti organici e inorganici sulla superficie della discarica. La capacità di acquisire queste informazioni senza contatto diretto rappresenta un vantaggio operativo fondamentale, particolarmente in presenza di rifiuti di origine sconosciuta che potrebbero contenere sostanze altamente pericolose [4].

### **3. Sorgenti orfane**

La problematica delle sorgenti radioattive orfane costituisce una delle sfide più complesse e delicate nell'ambito della sicurezza radiologica, con implicazioni dirette sulla protezione dei lavoratori e della popolazione. Questi materiali radioattivi, provenienti da attività industriali, mediche o di ricerca del passato, possono trovarsi dispersi nell'ambiente a seguito di gestioni inadeguate, dismissioni non controllate o smarrimenti accidentali. L'integrazione [5] di un rilevatore di radiazioni ionizzanti sulla piattaforma SAPR rappresenta una soluzione tecnologicamente avanzata per l'identificazione e la localizzazione di queste sorgenti, permettendo di condurre campagne di ricerca sistematiche senza esporre il personale ai rischi associati all'irraggiamento [1].



Figura 4: Esempio di una potenziale sorgente orfana

Il sistema di rilevazione radiometrica previsto per l'implementazione sul drone si basa su detector a scintillazione o a semiconduttore capaci di rilevare radiazioni gamma e beta con elevata sensibilità ed efficienza. La configurazione ottimale prevede l'utilizzo di rivelatori con capacità spettroscopiche, che permettono non solo di quantificare l'intensità del campo radiante ma anche di identificare gli isotopi responsabili dell'emissione attraverso l'analisi delle energie caratteristiche della radiazione rilevata. Questa capacità di caratterizzazione isotopica risulta fondamentale per valutare la pericolosità della sorgente e per pianificare le appropriate misure di intervento, considerando che diversi radionuclidi presentano rischi radiologici significativamente differenti in termini di dose efficace e vie di esposizione.

L'approccio operativo per la ricerca di sorgenti orfane mediante drone prevede l'esecuzione di voli sistematici secondo griglie predefinite, con acquisizione continua dei dati radiometrici georeferenziati. L'elaborazione in tempo reale delle informazioni permette di identificare immediatamente anomalie nel fondo ambientale di radioattività, guidando il pilota verso le aree di interesse per acquisizioni più dettagliate. La capacità di variare l'altezza di volo consente di ottimizzare il compromesso tra copertura areale e sensibilità di rilevazione, permettendo di adattare la strategia di ricerca alle caratteristiche specifiche del sito investigato. La trasmissione in tempo reale dei dati a una stazione di controllo remota permette la valutazione immediata del rischio radiologico e l'attivazione tempestiva delle procedure di emergenza qualora necessario.

La mappatura radiometrica tridimensionale ottenibile attraverso l'integrazione dei dati di volo con modelli digitali del terreno permette di ricostruire con precisione la distribuzione spaziale del campo radiante, informazione essenziale per la pianificazione degli interventi di recupero e messa in sicurezza. La possibilità di effettuare queste valutazioni mantenendo il personale a distanza di sicurezza rappresenta

un vantaggio operativo fondamentale, particolarmente in situazioni dove l'intensità della sorgente o la sua collocazione in aree di difficile accesso renderebbero estremamente rischiose le operazioni di ricerca tradizionali. Il sistema permette inoltre di documentare in modo oggettivo e ripetibile le condizioni radiometriche del sito, fornendo elementi probatori essenziali per le eventuali azioni legali e per la comunicazione del rischio alla popolazione.

L'integrazione della rilevazione radiometrica con le altre capacità sensoristiche del drone permette di ottenere una caratterizzazione completa del contesto in cui si trova la sorgente orfana. Le immagini ottiche e termiche possono fornire informazioni cruciali sulla natura del contenitore, sullo stato di conservazione della schermatura e sulla presenza di eventuali danneggiamenti che potrebbero aver causato dispersione di materiale radioattivo nell'ambiente. Questa visione integrata risulta particolarmente importante quando la sorgente si trova in contesti industriali complessi o in aree contaminate da altre sostanze pericolose, dove la pianificazione dell'intervento deve considerare molteplici fattori di rischio [4] [13].

#### **4. Sversamenti accidentali**

Gli eventi di sversamento accidentale di sostanze pericolose rappresentano situazioni di emergenza che richiedono interventi rapidi e coordinati per minimizzare l'impatto ambientale e proteggere la salute dei lavoratori e della popolazione. L'impiego della tecnologia SAPR in questi scenari critici offre capacità uniche di valutazione immediata dell'estensione e della gravità dell'evento, permettendo di acquisire informazioni cruciali per la gestione dell'emergenza senza esporre il personale di primo intervento a rischi non necessari. La versatilità della piattaforma aerea e la possibilità di equipaggiarla con sensoristica diversificata consentono di adattare la risposta alle caratteristiche specifiche della sostanza sversata e del contesto ambientale interessato. La configurazione base del sistema, dotata di fotocamera ad alta risoluzione e termocamera, permette di effettuare una prima valutazione visiva e termica dell'area interessata dallo sversamento. Le immagini aeree forniscono una prospettiva privilegiata per valutare l'estensione della contaminazione, identificare i percorsi di migrazione della sostanza sversata e individuare recettori sensibili potenzialmente a rischio.



Figura 5: Ripresa termografica di un terreno con sversamento

La documentazione fotografica georeferenziata costituisce inoltre un elemento fondamentale per la ricostruzione della dinamica dell'evento e per il monitoraggio dell'evoluzione temporale della contaminazione. La capacità di acquisire immagini in sequenza rapida permette di documentare fenomeni dinamici come la dispersione di nubi tossiche o la propagazione di sostanze sulla superficie dell'acqua.

L'analisi termografica risulta particolarmente utile per l'identificazione di reazioni chimiche in corso, che possono manifestarsi attraverso variazioni di temperatura rispetto all'ambiente circostante. Sversamenti di sostanze criogeniche, ad esempio, generano caratteristiche impronte termiche fredde facilmente rilevabili, mentre reazioni esotermiche tra la sostanza sversata e l'ambiente possono creare punti caldi indicativi di potenziali rischi di incendio o esplosione. La mappatura termica permette inoltre di identificare la presenza di sostanze in fase di evaporazione, informazione cruciale per valutare il rischio di formazione di atmosfere tossiche o esplosive e per definire le aree di esclusione necessarie per la protezione del personale [8].

L'evoluzione del sistema prevede l'integrazione di sensori chimici specifici capaci di rilevare e quantificare la presenza di vapori e gas pericolosi nell'atmosfera sovrastante l'area di sversamento. Questa capacità di monitoraggio chimico remoto risulta essenziale per valutare il rischio di esposizione inalatoria e per verificare l'efficacia delle misure di contenimento adottate. La possibilità di effettuare misurazioni in continuo durante l'evoluzione dell'emergenza permette di adattare dinamicamente le strategie di intervento e di ottimizzare l'impiego delle risorse disponibili. I dati acquisiti possono essere integrati con modelli di dispersione atmosferica per prevedere l'evoluzione della contaminazione e identificare le aree potenzialmente a rischio.

L'implementazione futura di una camera multispettrale in questo ambito consentirà l'identificazione diretta della natura chimica della sostanza sversata attraverso l'analisi delle sue proprietà spettrali, informazione spesso critica nelle prime fasi dell'emergenza quando l'origine dello sversamento è sconosciuta. Questa tecnologia permetterà inoltre di mappare con precisione l'estensione della contaminazione superficiale, distinguendo tra diverse concentrazioni della sostanza e identificando aree dove il contaminante è penetrato nel suolo o si è mescolato con altre matrici ambientali. La capacità di effettuare queste valutazioni rapidamente e da remoto rappresenta un vantaggio operativo fondamentale per la gestione efficace dell'emergenza [5] [8] [14].

## **5. Monitoraggi industriali**

Il monitoraggio della sicurezza in ambito industriale attraverso l'impiego di sistemi SAPR rappresenta un'applicazione di frontiera che coniuga l'esigenza di sorveglianza continua con la necessità di minimizzare l'esposizione dei lavoratori a condizioni operative potenzialmente pericolose. Gli impianti industriali complessi, quali raffinerie, stabilimenti chimici e centrali di produzione energetica, presentano sfide uniche in termini di accessibilità, estensione areale e molteplicità dei rischi presenti. L'implementazione di un sistema di monitoraggio aereo permette di superare molte delle limitazioni associate alle ispezioni tradizionali, fornendo una prospettiva globale dell'impianto e la capacità di raggiungere aree normalmente inaccessibili o che richiederebbero l'interruzione delle attività produttive.



Figura 6: Esempio di una ripresa aerea di un sito industriale

La potenziale dotazione sensoristica del drone consentirebbe di effettuare ispezioni visive dettagliate delle strutture e degli impianti, identificando potenziali criticità quali corrosione, danneggiamenti strutturali, perdite o malfunzionamenti degli equipaggiamenti. La fotocamera ad alta risoluzione permette di acquisire immagini con un livello di dettaglio sufficiente per valutare lo stato di conservazione di componenti critici come tubazioni, valvole, serbatoi e strutture di supporto, documentando eventuali anomalie per le successive valutazioni tecniche. La possibilità di effettuare queste ispezioni senza necessità di installare ponteggi o utilizzare piattaforme elevatrici riduce significativamente i rischi associati al lavoro in quota e i tempi di fermo impianto necessari per le verifiche periodiche.

La termografia industriale mediante drone rappresenta una delle applicazioni più mature e consolidate della tecnologia, permettendo l'identificazione di anomalie termiche indicative di malfunzionamenti o inefficienze operative. La termocamera installata sul sistema consente di rilevare surriscaldamenti localizzati in componenti elettrici e meccanici, identificare perdite di energia termica attraverso difetti nell'isolamento, e monitorare l'efficienza dei sistemi di raffreddamento e dissipazione del calore. Nel settore elettrico, la termografia aerea permette di ispezionare trasformatori, interruttori e linee di distribuzione identificando punti caldi che potrebbero evolvere in guasti catastrofici. La capacità di effettuare questi controlli con l'impianto in esercizio rappresenta un vantaggio operativo significativo, permettendo la manutenzione predittiva e la prevenzione di fermi non programmati.

L'integrazione prevista di sensori per la rilevazione di gas e vapori permetterà di implementare un sistema di monitoraggio delle emissioni fuggitive, problematica di crescente rilevanza nel contesto della sostenibilità ambientale e della sicurezza industriale. La capacità di rilevare e localizzare perdite di metano, composti organici volatili o altri gas industriali attraverso sorvoli programmati dell'impianto consente di identificare rapidamente criticità che potrebbero evolvere in situazioni di rischio per i lavoratori o per l'ambiente.

Questa applicazione risulta particolarmente rilevante nel settore oil&gas, dove le emissioni fuggitive rappresentano non solo un rischio per la sicurezza ma anche una perdita economica significativa e un contributo alle emissioni di gas serra [9] [10]. La futura implementazione di sistemi di imaging multispettrale e iperspettrale aprirà nuove possibilità per il monitoraggio industriale avanzato, permettendo l'identificazione di contaminazioni superficiali, la valutazione dello stato di conservazione dei rivestimenti protettivi e la rilevazione precoce di fenomeni corrosivi. Queste tecnologie consentiranno inoltre di monitorare l'efficacia dei sistemi di abbattimento delle emissioni e di verificare la conformità ambientale delle operazioni industriali attraverso la rilevazione diretta di specifici inquinanti nell'ambiente circostante l'impianto [15].

## 6. *Ambito agricolo*

L'applicazione della tecnologia SAPR nel settore agricolo per la tutela della salute e sicurezza dei lavoratori rappresenta un'area di sviluppo particolarmente promettente, considerando le specificità e le criticità che caratterizzano questo comparto produttivo. L'agricoltura moderna presenta infatti molteplici fattori di rischio per gli operatori, dalla conformazione spesso irregolare e instabile del terreno all'utilizzo di macchinari complessi, dall'esposizione a sostanze chimiche pericolose alle condizioni ambientali variabili e difficilmente prevedibili. L'implementazione di sistemi di monitoraggio aereo in questo contesto consente di affrontare queste problematiche con un approccio innovativo, riducendo l'esposizione diretta dei lavoratori a situazioni potenzialmente pericolose e fornendo strumenti avanzati per la prevenzione degli infortuni.

La configurazione attuale del drone, equipaggiato con termocamera e sistema di imaging ad alta definizione, permette di effettuare rilevamenti multidimensionali particolarmente utili per l'identificazione preventiva di situazioni di rischio. La termografia aerea consente di rilevare anomalie termiche del terreno che possono indicare la presenza di materiali interrati pericolosi, accumuli di sostanze in decomposizione o



Figura 7: Ripresa aerea di un sito agricolo

variazioni di umidità che potrebbero compromettere la stabilità del suolo e conseguentemente la sicurezza nell'utilizzo di mezzi agricoli pesanti. Questa capacità diagnostica risulta particolarmente rilevante in contesti agricoli estensivi, dove la vastità delle superfici coltivate rende impraticabile un monitoraggio capillare attraverso ispezioni terrestri tradizionali. La possibilità di identificare preventivamente aree critiche permette di pianificare percorsi sicuri per i mezzi agricoli e di evitare situazioni che potrebbero portare a ribaltamenti o sprofondamenti.

Il monitoraggio termografico trova applicazione anche nella prevenzione degli incendi, problematica di crescente rilevanza nel contesto dei cambiamenti climatici e dell'intensificazione dei fenomeni di siccità. La capacità di rilevare focolai incipienti attraverso l'identificazione di punti caldi anomali permette interventi tempestivi che possono prevenire la propagazione del fuoco a vaste aree coltivate, proteggendo non solo le colture ma soprattutto la sicurezza dei lavoratori agricoli che potrebbero trovarsi nell'area interessata. Il sistema risulta particolarmente efficace nel monitoraggio di aree di stoccaggio di materiali combustibili come fienili, depositi di paglia e biomasse, dove fenomeni di autocombustione possono svilupparsi in modo subdolo prima di manifestarsi visibilmente. La sorveglianza aerea periodica di queste strutture consente di identificare incrementi termici anomali che precedono l'innescio della combustione, permettendo interventi preventivi.

L'analisi visiva ad alta risoluzione fornita dal sistema ottico del drone permette l'identificazione e la documentazione di molteplici fattori di rischio presenti nell'ambiente agricolo. La capacità di effettuare ricognizioni aeree sistematiche consente di individuare attrezzature abbandonate che potrebbero costituire pericolo per i lavoratori, verificare lo stato di manutenzione delle infrastrutture agricole come silos e strutture di stoccaggio, e identificare la presenza di contaminazioni superficiali o accumuli di rifiuti potenzialmente pericolosi. La prospettiva aerea offre inoltre vantaggi unici nell'identificazione di problematiche strutturali in edifici agricoli, permettendo di rilevare cedimenti, danneggiamenti delle coperture o altre criticità che potrebbero compromettere la sicurezza degli operatori. La documentazione fotografica georeferenziata costituisce inoltre uno strumento prezioso per la formazione del personale, permettendo di illustrare situazioni di rischio reali e di sviluppare procedure operative più sicure.

L'evoluzione prevista del sistema contempla l'integrazione di sensori specifici per il monitoraggio della qualità dell'aria e la rilevazione di sostanze pericolose aerodisperse, capacità particolarmente rilevante nel contesto dell'utilizzo di prodotti fitosanitari. Sebbene il progetto non preveda l'impiego diretto del drone per la distribuzione di fitofarmaci, la possibilità di monitorare la presenza e la concentrazione di residui di pesticidi nell'ambiente di lavoro rappresenta uno strumento fondamentale per la tutela della salute dei lavoratori agricoli. I campionatori ambientali che verranno integrati nel sistema permetteranno di valutare l'esposizione dei lavoratori a sostanze potenzialmente nocive, verificare l'efficacia delle misure di protezione adottate e ottimizzare i tempi di rientro nei campi trattati. Questa capacità di monitoraggio remoto risulta particolarmente importante considerando che l'esposizione cronica a basse dosi di fitofarmaci rappresenta uno dei principali rischi per la salute nel settore agricolo.

## 7. Conclusioni

L'implementazione di Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto per la tutela della salute e sicurezza nei luoghi di lavoro rappresenta un cambio di paradigma nell'approccio alla prevenzione dei rischi occupazionali, configurandosi come una risposta tecnologicamente avanzata alle sfide sempre più complesse poste dai moderni contesti produttivi. Il percorso di ricerca e sviluppo intrapreso dal Laboratorio VI del Dipartimento Innovazioni Tecnologiche dell'INAIL dimostra come l'innovazione tecnologica possa tradursi in strumenti concreti per la protezione dei lavoratori, coniugando efficacia operativa, versatilità applicativa e sostenibilità economica

I risultati preliminari ottenuti nelle diverse aree di applicazione confermano il potenziale trasformativo di questa tecnologia. La capacità di effettuare valutazioni accurate e dettagliate mantenendo il personale a distanza di sicurezza rappresenta un avanzamento fondamentale rispetto alle metodologie tradizionali, permettendo di affrontare situazioni di rischio precedentemente gestibili solo attraverso l'esposizione diretta dei lavoratori a condizioni potenzialmente pericolose. La versatilità della piattaforma tecnologica sviluppata, capace di adattarsi a contesti operativi estremamente diversificati attraverso la modulazione della configurazione sensoristica, dimostra la validità dell'approccio metodologico adottato e apre prospettive significative per ulteriori sviluppi applicativi.

L'integrazione progressiva di tecnologie sensoristiche sempre più sofisticate, dalla spettroscopia iperspettrale ai sensori chimici selettivi, dalla radiometria alla caratterizzazione biologica, delinea un orizzonte evolutivo in cui i sistemi SAPR diventeranno strumenti indispensabili per la gestione integrata della sicurezza occupazionale. La capacità di acquisire, processare e integrare informazioni multidimensionali in tempo reale permetterà lo sviluppo di modelli predittivi sempre più accurati, trasformando l'approccio alla sicurezza sul lavoro da reattivo a proattivo, con la possibilità di anticipare e prevenire situazioni di rischio prima che queste si manifestino.

Il percorso di sviluppo tecnologico e metodologico delineato richiede tuttavia un approccio multidisciplinare che integri competenze ingegneristiche, chimiche, ambientali e normative. La complessità dei sistemi sviluppati e la criticità delle applicazioni previste impongono standard elevati di affidabilità, precisione e robustezza operativa. La formazione specialistica degli operatori, lo sviluppo di protocolli operativi standardizzati e la definizione di framework normativi adeguati rappresentano elementi essenziali per garantire l'efficace implementazione di queste tecnologie nel contesto produttivo nazionale [2] [5] [7]. La collaborazione tra istituzioni di ricerca, enti normativi e realtà produttive risulta fondamentale per assicurare che l'innovazione tecnologica si traduca in benefici concreti per la sicurezza e la salute dei lavoratori.

Le prospettive future del progetto contemplano l'espansione delle capacità operative attraverso l'implementazione di sistemi di intelligenza artificiale per l'analisi automatica dei dati acquisiti, lo sviluppo di algoritmi di pianificazione autonoma delle missioni e l'integrazione con piattaforme di gestione della sicurezza aziendale. La creazione di database condivisi di informazioni georeferenziate sui rischi permetterà di costruire una mappatura dinamica delle criticità a livello territoriale, fornendo strumenti

preziosi per la pianificazione degli interventi e per l'ottimizzazione delle risorse disponibili. L'evoluzione verso sistemi sempre più autonomi e intelligenti non deve tuttavia far perdere di vista l'obiettivo primario della tecnologia: la protezione della vita e della salute dei lavoratori attraverso l'eliminazione o la riduzione dell'esposizione ai rischi. In sostanza, l'implementazione di sistemi SAPR per la sicurezza occupazionale rappresenta non solo un'opportunità tecnologica ma una necessità operativa in un contesto produttivo sempre più complesso e sfidante. I risultati ottenuti e le prospettive delineate dal progetto di ricerca confermano il ruolo centrale che queste tecnologie sono destinate a svolgere nel futuro della prevenzione e protezione nei luoghi di lavoro, contribuendo significativamente al raggiungimento degli obiettivi di riduzione degli infortuni e delle malattie professionali stabiliti a livello nazionale ed europeo. Il cammino intrapreso, seppur ancora nelle fasi iniziali di sviluppo, traccia una direzione chiara verso un futuro in cui la tecnologia diventa alleato fondamentale nella tutela per la salute e la sicurezza di chi lavora.

**BIBLIOGRAFIA:**

1. Grosso Matteo, Montrano Michele, Crimi Salvatore, "L'utilizzo dei droni come misura di prevenzione antinfortunistica: un tentativo di oggettivizzazione della regola cautelare", *Prevenzione in Corso*, n.12, 2025, <https://ojs.unito.it/index.php/pinc/article/view/12135/9891>
2. Pascucci Paolo, "La tutela della sicurezza sul lavoro nelle attività all'aperto con l'uso dei droni (SAPR)", *Cultura giuridica e diritto vivente*, Vol. 7, 2020, <https://journals.uniurb.it/index.php/cgdv/article/download/2173/1956/9005>
3. Agenzia Europea EU-OSHA, "Ridurre i rischi dei lavoratori usando i droni e l'intelligenza artificiale", *Punto Sicuro*, 2023, <https://www.puntosicuro.it/robotica-intelligenza-artificiale-C-137/ridurre-i-rischi-dei-lavoratori-usando-i-droni-l-intelligenza-artificiale-AR-23420/>
4. Della Giustina Camilla, "Droni. Il rapporto tra le pubbliche utilità e la privacy nell'esercizio degli unmanned vehicles", *Università degli Studi di Trieste*, 2024, <https://eut.units.it/it/catalogo/droni-il-rapporto-tra-le-pubbliche-utilita-e-la-privacy-nell-esercizio-degli-unmanned-vehicles/10024>
5. Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC), "Normativa Droni - Linee guida U-Space", 2024, <https://www.enac.gov.it/sicurezza-aerea/droni/operatori-di-droni-uas/normativa-droni/>
6. Alberti Ludovica, "Il monitoraggio dei siti contaminati con Drone", *Green Science*, 2025, <https://www.greenscience.it/il-monitoraggio-dei-siti-contaminati-con-drone/>
7. Garzillo E.M. et al., "Droni ed ispezioni nei luoghi di lavoro. Una nuova tecnologia a supporto degli organi di vigilanza", 2024, <https://iris.univr.it/handle/11562/1140971>
8. APR Flytech, "Ispezioni di Termografia con Drone", 2022, <https://www.aprflytech.it/servizi/termografia-con-drone>
9. Arpav, "Arpav sperimenta i droni per il monitoraggio ambientale nei progetti europei", 2025, <https://www.arpav.veneto.it/notizie/in-primo-piano/arpav-sperimenta-i-droni-per-il-monitoraggio-ambientale-nei-progetti-europei>
10. Istituto di nanotecnologia CNR - Nanotec, "Un drone per monitorare la qualità dell'aria", 2025, <https://iia.cnr.it/un-drone-per-monitorare-la-qualita-dellaria/>
11. Regione Puglia, "Discarica abusiva individuata con i droni della Regione Puglia", 2024, <https://press.regione.puglia.it/-/discarica-abusiva-individuata-con-i-droni-della-regione-puglia.-operazione-congiunta-sezione-di-vigilanza-ambientale-polizia-stradale>
12. Dta Scarl, "A caccia delle discariche abusive e degli inquinatori del territorio attraverso le tecnologie dei droni", 2023, <https://www.dtascarl.org/2023/07/21/a-caccia-delle-discariche-abusive-e-degli-inquinatori-del-territorioattraverso-le-tecnologie-dei-droni/>

13. Zyteknno, "Eyes in the Sky - How drones are revolutionizing homeland security radiation detection", 2024, <https://zytekno.com/it/eyes-in-the-sky-how-drones-are-revolutionizing-homeland-security-radiation-detection/>
14. Skycrab Academy, "Termografia con Drone: Svelare il Mondo Termico dall'Alto", 2023, <https://skycrabacademy.net/blogs/notizie/termografia-con-drone-svelare-il-mondo-termico-dallalto>
15. Elite Consulting, "Ispezione con Droni", 2024, <https://eliteconsulting.it/ispezione-con-droni/>





