



Ricerca di Sistema elettrico

## Monitoraggio aereo per lo smart district: test su sottostazione elettrica, sistema di ausilio al pilota, calibrazione sensori

S. Taraglio, L. Blasi, G. Cupertino, C. Moriconi, V. Nanni, S. De Vito,  
F. Formisano, E. Massera

## MONITORAGGIO AEREO PER LO SMART DISTRICT: TEST SU SOTTOSTAZIONE ELETTRICA, SISTEMA DI AUSILIO AL PILOTA, CALIBRAZIONE SENSORI

S. Taraglio, L. Blasi, G. Cupertino, C. Moriconi, V. Nanni, S. De Vito, F. Formisano, E. Massera

Dicembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.6 Sviluppo di un modello integrato di smart district urbano

Obiettivo: d – Sicurezza infrastrutture critiche e monitoraggio aereo dello Smart District – Sotto-obiettivo d.2: Monitoraggio aereo dello smart district

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 CAMPAGNA DI ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI DI UNA SOTTO STAZIONE ELETTRICA .....	5
2.2 TEST DELL'ALGORITMO PER IL SUGGERIMENTO DI TRAIETTORIE SICURE .....	9
2.3 OTTIMIZZAZIONE DELLE PROCEDURE DI CALIBRAZIONE DI SENSORI CHIMICI .....	12
2.3.1 <i>Realizzazione delle modifiche all'impianto di condizionamento e caratterizzazione sensori</i> .....	13
2.3.2 <i>Problematiche riscontrate nel corso delle attività sperimentali</i> .....	13
3 CONCLUSIONI.....	15
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	18
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	19
6 INDICE DELLE FIGURE .....	20

## Sommario

Questo report presenta le attività del Piano Annuale di Realizzazione 2018 (PAR) relative al sotto obiettivo “Monitoraggio aereo dello smart district” dell’obiettivo “Sicurezza infrastrutture critiche e monitoraggio aereo dello Smart District” del progetto “Sviluppo di un modello integrato di Smart District urbano”.

Le attività hanno avuto una durata temporale di tre mesi.

Le attività relative ai precedenti Piani Annuali di Realizzazione 2016 e 2017 hanno portato alla realizzazione di un dimostratore per il monitoraggio energetico degli edifici energivori e per quello ambientale per ciò che attiene alla qualità dell’aria; tale dimostratore si basa sulla tecnologia degli aeromobili a pilotaggio remoto multi elica usualmente indicati con il termine drone.

Esso è equipaggiato con due diversi *payload* al variare della missione di monitoraggio. Il primo è una *suite* di sensori chimici sensibili ad alcuni inquinanti dell’aria, il secondo è un sistema composto da una termocamera e da una telecamera video, accoppiate. Tramite questi due *payload* è possibile monitorare le prestazioni energetiche degli edifici sia dal punto di vista delle dispersioni termiche, che da quello della produzione di inquinanti legati alle attività energetiche quali il riscaldamento. Nell’ambito delle attività dei PAR 2016 e 2017, oltre al sistema di monitoraggio vero e proprio, è stato sviluppato un algoritmo di supporto al pilota e sono stati studiati altri sensori chimici per equipaggiare il drone.

Le attività nel PAR 2018 si sono indirizzate verso tre filoni principali: il test del sistema di monitoraggio in un diverso contesto, il test dell’algoritmo di supporto al pilota in ambiente reale e l’ottimizzazione della calibrazione di sensori chimici. Il primo ed il secondo argomento sono stati seguiti dal Laboratorio di Robotica dell’ENEA (DTE-SEN-IDRA) ed il terzo dal Laboratorio ENEA Dispositivi Innovativi (DTE-FSN-DIN).

Più in dettaglio, le attività si sono indirizzate verso la realizzazione di una campagna di misura su di un elemento specifico dell’infrastruttura elettrica: una sotto stazione di distribuzione a media tensione per verificare la funzionalità del sistema in tale contesto, studiando, cioè, l’utilizzabilità del sistema drone – elaborazione per la realizzazione di un modello 3D della sottostazione e l’utilizzo dei dati termografici per la sua analisi. Durante queste attività si è ottimizzato un protocollo avanzato per la gestione e l’elaborazione dei dati in stretta collaborazione con il Laboratorio DTE-SEN-APIC, responsabile del sotto obiettivo d.2.

Si è poi compiuto un test di funzionalità dell’algoritmo realizzato nell’annualità precedente allo scopo di fornire supporto al pilota del drone in ambiente urbano. L’algoritmo suggerisce una traiettoria di volo sicura al pilota del drone al fine di evitare un eccessivo avvicinamento agli edifici da monitorare o ad eventuale altro traffico aereo nella zona oggetto del monitoraggio. Tali esperimenti sono stati condotti non in volo simulato, come nelle attività del PAR 2017, bensì in condizioni di volo reale, in ambiente operativo.

Ulteriori attività sono state indirizzate all’ottimizzazione delle procedure di calibrazione del parco sensori per l’analisi chimica dell’aria, per la risoluzione di alcune problematiche riscontrate nel corso delle attività sperimentali dell’annualità precedente, in particolare per ciò che attiene all’ottimizzazione delle procedure di calibrazione dei sensori stessi.

## 1 Introduzione

Una delle attività relative allo Smart District è quella del monitoraggio, cioè la rilevazione periodica e sistematica di parametri chimici e fisici, mediante appositi strumenti, allo scopo di controllarne la situazione puntuale o l'andamento temporale. In questo Rapporto Tecnico si descrivono le attività svolte nell'ambito del Piano Annuale di Realizzazione 2018, della durata di tre mesi, intorno ad un dimostratore basato sulla tecnologia dei droni multi elica, volto al monitoraggio energetico esterno degli edifici energivori e a quello ambientale per ciò che concerne la qualità dell'aria [1] [2].

Il monitoraggio esterno degli edifici per le eventuali dispersioni di calore e la loro misura è un evidente strumento per migliorare le caratteristiche energetiche di un fabbricato, meno evidente è l'utilizzo di una analisi della qualità dell'aria. Il monitoraggio della qualità dell'aria può essere considerato come un modo integrativo per lo studio energetico degli immobili. Infatti la qualità dell'aria dipende fortemente dalle attività energetiche dell'uomo (riscaldamento, autotrazione, etc.) ed è quindi intrinsecamente legata alle caratteristiche energetiche degli edifici: migliorare l'isolamento termico in una costruzione porta a minori inquinanti atmosferici derivanti dal suo riscaldamento; allo stesso modo, prevedere modi più efficienti di trasporto urbano può ridurre il traffico ed il conseguente inquinamento. Quindi la misura della qualità dell'aria permette una descrizione più accurata del quadro energetico globale dello *Smart District*, aggiungendo ulteriori variabili quantitative e qualitative e consentendo una descrizione più accurata della situazione generale.

Nel corso del Piano Annuale di Realizzazione 2018 sono state realizzate attività riguardanti l'acquisizione e l'elaborazione di dati provenienti dalla piattaforma volante teleguidata da terra utilizzata per il monitoraggio di una sottostazione elettrica. Altro filone ha riguardato il test di un algoritmo di supporto al pilota del drone allo scopo di suggerire possibili traiettorie di volo che mantengano distanze di sicurezza tra il velivolo e la struttura monitorata ed eventuali altri sistemi RPAS (Remotely Piloted Aerial System, droni) presenti nell'area. Queste attività di test sono state svolte in ambiente operativo al contrario a quanto svolto nella precedente annualità, dove erano state condotte all'interno di una simulazione.

Sono altresì proseguite le attività per equipaggiare il drone con ulteriori sensori chimici provenienti da un sistema portatile di misura recentemente sviluppato in ENEA con finalità simili. In particolare le attività sono state dirette all'ottimizzazione delle procedure di calibrazione dei sensori chimici per la risoluzione di alcune problematiche riscontrate nel corso delle attività sperimentali del PAR2017.

Le attività del Piano Annuale di Realizzazione 2018 si sono dunque svolte con la seguente articolazione:

- campagna di acquisizione ed elaborazione dati di una sotto stazione elettrica;
- test 'in vivo' dell'algoritmo per il suggerimento di traiettorie sicure al pilota del drone;
- ottimizzazione delle procedure di calibrazione di sensori chimici.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Campagna di acquisizione ed elaborazione dati di una sotto stazione elettrica

Nel corso dell'annualità 2017 è stata messa a punto una soluzione tecnologica per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati raccolti dal drone nelle bande del visibile, dell'infrarosso termico e nelle concentrazioni di alcune specie chimiche. Questa soluzione prevede la georeferenziazione delle misure chimiche ed ottiche nel contesto del sistema di supporto alle decisioni DSS (Decision Support System) realizzato nel sotto obiettivo d.1 [3].

Le misure chimiche sono rese disponibili all'end user in forma mappale [2], in quanto questo è il modo più naturale ed intuitivo. Per quello che riguarda invece i dati video, si è ricorsi allo sviluppo di una procedura basata sulla cosiddetta Structure from Motion (SfM), ovvero struttura dal movimento. Con questo nome si indica una classe di algoritmi di computer vision che permettono di inferire la tridimensionalità degli oggetti mettendo in relazioni diverse immagini riprese da punti di vista diversi degli oggetti stessi. La motivazione

per un tale approccio risiede nella sua capacità di sintetizzare in un solo modello 3D la molteplicità di immagini e filmati in ingresso. Sono stati confrontati e messi alla prova alcuni software *open source* per la realizzazione di modelli, realizzando modelli 3D visuali e, soprattutto, aprendo la strada a termografie tridimensionali che permettono un'analisi semplificata di oggetti quali gli edifici.

In maggior dettaglio, La SfM è quell'approccio in cui si utilizzano più inquadrature di un dato soggetto, riprese da una camera in movimento (di qui il nome), oppure più immagini riprese da più camere da diversi punti di vista. La triangolazione di punti corrispondenti sulle varie immagini permette poi la ricostruzione della tridimensionalità del soggetto ripreso. Questa classe di algoritmi è recentemente tornata di attualità grazie alle aumentate disponibilità di capacità di calcolo nei computer odierni e, più in generale, allo sviluppo della computer vision. Infatti questi algoritmi si basano su procedure di calcolo molto intense che elaborano un numero molto elevato di punti allo stesso tempo.

Al termine di questa procedura si ha un modello di superficie usualmente descritto da un file di tipo PLY (PoLYgon file format), testuale o binario, nel quale vengono elencati i vertici ed i triangoli che formano la superficie insieme ad un file immagine che contiene il drappeggio. La visualizzazione di questo file può essere fatta usando opportuni software di visualizzazione 3D; nel corso della passata annualità è stato realizzato un visualizzatore che opera all'interno di una pagina web, permettendo una facile fruizione dei dati da parte di un utente anche poco esperto. Il visualizzatore è integrato all'interno del DSS (sotto obiettivo d.1), che, quindi, può facilmente richiamare il modello 3D all'interno delle proprie funzionalità.

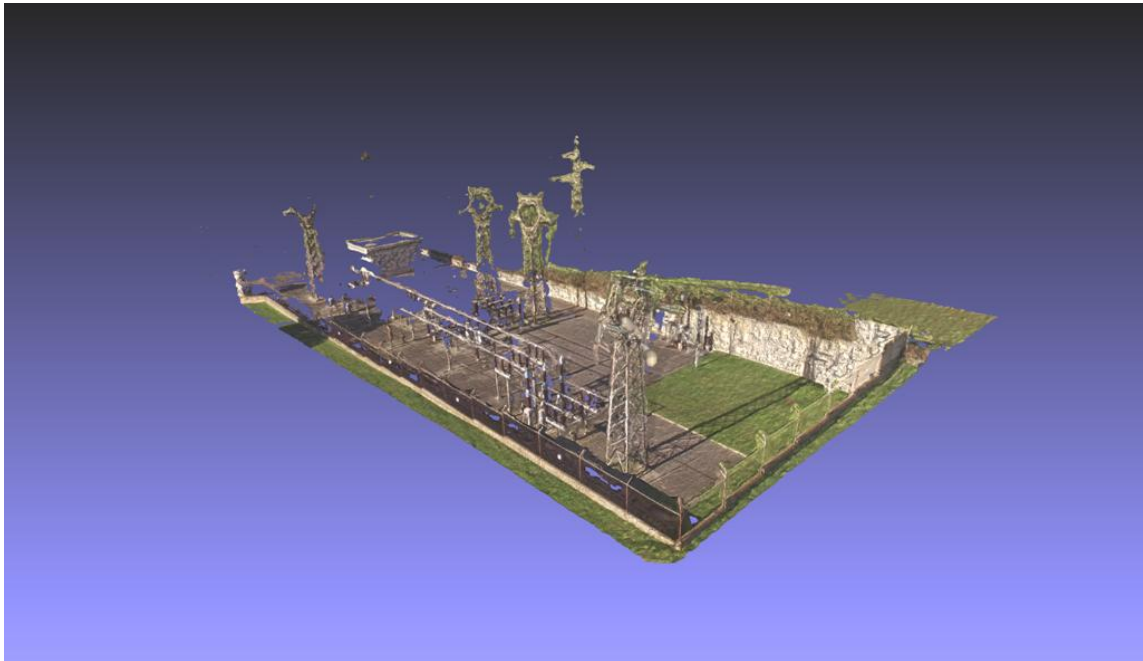
Nel corso della passata annualità sono stati compiuti alcuni voli di raccolta dati intorno ad edifici, per verificare la funzionalità del sistema. Nel corso del presente periodo di lavoro si sono volute invece verificare le funzionalità in un ambito operativo diverso: si è scelto di monitorare un elemento specifico del sistema elettrico, una sottostazione di distribuzione a media tensione, presente nel Centro Ricerche Casaccia.

Una sottostazione elettrica è usualmente localizzata in prossimità di un impianto di produzione, nel punto di consegna all'utente finale e nei punti di interconnessione tra le linee: essa costituisce pertanto un nodo della rete di trasmissione dell'energia elettrica. Essa svolge una o più delle seguenti funzioni: interconnettere tra loro più linee elettriche in alta tensione allo stesso livello di tensione, creando un nodo della rete; interconnettere tra loro più linee elettriche in alta tensione a diversi livelli di tensione tramite trasformatori; rifasare la potenza apparente della rete (tramite batterie di condensatori o induttori di rifasamento); convertire la tensione da alternata in continua e viceversa (sottostazioni di conversione).

Scopo di questo monitoraggio è quello di controllare il buon funzionamento della stazione elettrica. Per far ciò è importante la sorveglianza video e, soprattutto, quella termografica. Infatti il rischio di blackout e di abbassamenti di tensione sulla rete di distribuzione dell'energia elettrica è in aumento a causa dell'invecchiamento della infrastruttura e della generale mancanza di sistemi di automazione in grado di monitorare le condizioni delle attrezzature critiche. L'utilizzo della termografia scaturisce dall'osservazione che i componenti elettrici ed elettronici usualmente si surriscaldano prima di guastarsi. Ad esempio, le perdite di fluido del trasformatore o il guasto dell'isolamento interno causano surriscaldamenti che possono provocare guasti. Qualunque sia la causa, un guasto critico presso una sottostazione può sfociare in una serie di guasti a cascata. Il risultato può essere un disservizio massivo di strutture bancarie, di sistemi di sicurezza, di impianti di produzione, della refrigerazione di alimenti, di reti di comunicazione e di sistemi di controllo del traffico. Naturalmente, ciò implica grandi perdite finanziarie e costi enormi per rimettere in funzione i sistemi, costi e perdite che possono essere facilmente contenute con un monitoraggio che funga da *early-warning*, ovvero che si accorga di un problema sul nascere.

L'analisi dei casi di studio effettuata ha, in definitiva, messo in luce possibili utilizzi del sistema di monitoraggio per la mitigazione del rischio nell'analisi delle condizioni di esercizio di sottosistemi della rete elettrica quali le sottostazioni di media tensione. In altri termini, l'insieme delle misure effettuate e processate, soprattutto quelle termografiche, di concerto con i modelli di analisi sviluppati nel sotto obiettivo d.1 possono rappresentare un valido strumento di supporto alle decisioni che competono agli enti gestori, chiamati sia ad affrontare situazioni di emergenza, ma anche di manutenzione preventiva.

Si è dunque effettuata una campagna sperimentale visuale e termografica al di sopra della sottostazione elettrica; si è scelto di non realizzarne una con i sensori chimici, in quanto non ci si attendevano informazioni rilevanti con tali sensori. A valle della raccolta delle immagini e termografie sono stati utilizzati gli algoritmi di Structure from Motion e sono stati realizzati i relativi modelli 3D. In Figura 1 è mostrato il modello 3D realizzato a partire dalle immagini video della sottostazione elettrica.



**Figura 1. Il modello 3D visuale della sottostazione elettrica**

Sono chiaramente visibili le strutture della sottostazione: tralicci, sbarre, etc.. In Figura 2 sono invece mostrate due immagini termiche relative alla stessa stazione, ma riprese da altra angolazione, in volo ed a terra.



**Figura 2. Due immagini termiche della sottostazione elettrica monitorata**

In Figura 3 è riportato il modello 3D della sottostazione nella banda dell'infrarosso termico. Il modello è mostrato dallo stesso punto di vista della Figura 1, purtroppo esso si basa su alcune riprese effettuate ad una distanza troppo elevata, questo per rispettare i vincoli di volo nel C.R. Casaccia. Data la minor



dimensione delle immagini termiche (640 x 512) rispetto a quelle video (HD) ed anche ad un contenuto informativo più limitato (una sola banda di colore, contro le tre delle immagini video) il modello 3D non è risultato particolarmente accurato. La sottostazione è il rettangolo al centro in alto nell'immagine.

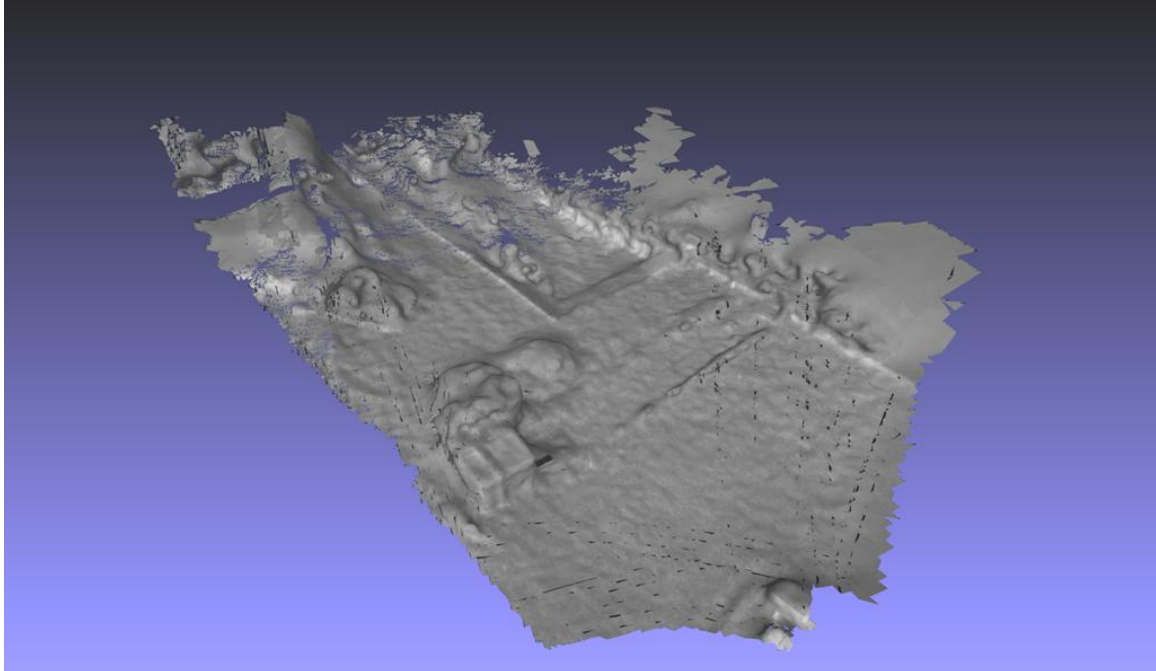


Figura 3. Il modello 3D nell'infrarosso termico della sottostazione elettrica

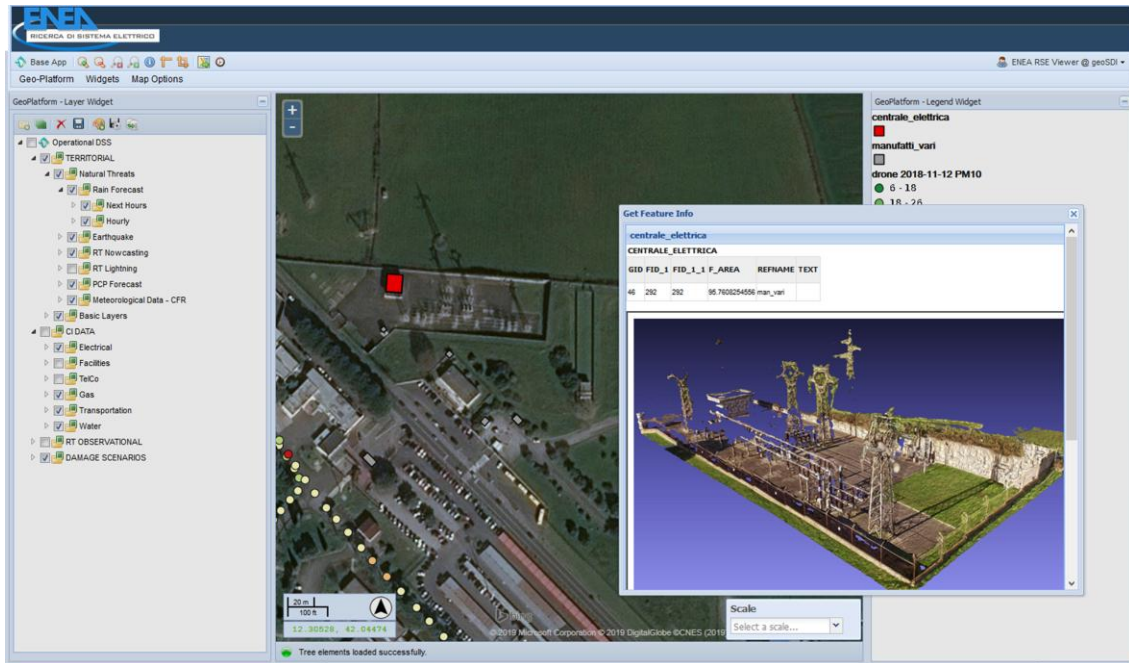


Figura 4. Il modello 3D della sottostazione elettrica nel sistema DSS

Le attività del sotto-obiettivo d.2 sono strettamente coordinate con quelle definite nel sotto-obiettivo d.1 [4], le prime forniscono dati e modelli tridimensionali alle seconde. Durante il PAR 2018 si è infatti



ottimizzato il protocollo avanzato di scambio dei dati tra il dispositivo di monitoraggio ed elaborazione e la piattaforma DSS, come visibile nella Figura 4, per gli elementi specifici del sistema elettrico, nel caso in esame la sottostazione di media tensione (MT). In Figura 4 è mostrata l'interfaccia utente del DSS da cui è possibile richiamare il display del modello 3D relativo all'elemento (in rosso) georeferenziato nella mappa.

## 2.2 Test dell'algoritmo per il suggerimento di traiettorie sicure

Durante l'annualità del PAR 2017 è stato realizzato un algoritmo di supporto al pilota, in grado di suggerirgli traiettorie di volo sicure. Questo algoritmo è stato disegnato derivandolo da un algoritmo basato sulla Teoria dei Giochi, sviluppato per l'aviazione generale, nell'ambito del progetto OLGA (Optimal routing for General Aviation), condotto nell'ambito di un accordo bilaterale Italia Israele, in grado di aumentare la consapevolezza del pilota di un aereo da diporto in presenza di altri velivoli o aree di maltempo e suggerendogli la rotta più sicura.

Nel caso qui in esame l'algoritmo è stato ripensato per l'applicazione di monitoraggio degli edifici: l'agente che utilizza l'algoritmo (il drone di monitoraggio) considera tutti gli altri eventuali droni presenti nell'area come agenti a maggiore priorità e considera gli edifici come 'zone di maltempo' entro cui non si deve volare. Con queste condizioni al contorno, va a calcolare la rotta più sicura, quella cioè che permette al drone di passare a sufficiente distanza (parametro dell'algoritmo) dagli altri agenti presenti nella zona (altri droni, velivoli o edifici). Per la bibliografia ed i dettagli dell'algoritmo si rimanda a [2].

E' qui necessario ricordare che un drone, secondo la legislazione italiana, non può essere autonomo, bensì deve essere sempre operato da un pilota che si assuma la responsabilità delle manovre compiute. Pertanto l'algoritmo è limitato a suggerire al pilota stesso la rotta, tramite un display.

Le funzionalità dell'algoritmo sono state messe alla prova nel corso del PAR 2017 in un ambiente simulato. In esso sono stati condotti esperimenti nei quali il pilota comandava la simulazione del proprio drone in un ambiente dove erano presenti edifici e, allo stesso tempo, altri due piloti comandavano altri due droni andando a disturbare le attività del primo.

Nel PAR 2018 si è invece passati a condurre esperimenti in ambiente reale, cioè con il drone reale in un ambiente operativo al di fuori dell'ambiente di simulazione.

Il set-up sperimentale prevede:

- il drone di monitoraggio comandato da un pilota che usufruisce dell'algoritmo;
- un ambiente operativo di test dove è presente un edificio le cui coordinate siano note a priori;
- un secondo drone, simulato, che però trasmetta la propria posizione nel medesimo modo di quello reale.

Il pilota del drone in volo ottiene il suggerimento della traiettoria più sicura tramite un display che mostra l'area di volo e gli ostacoli presenti in essa (sia gli edifici che gli eventuali altri droni).

Per mantenere un livello di sicurezza elevato, in questa configurazione sperimentale si è utilizzato come drone di disturbo, un drone simulato, che è pilotato da un secondo pilota e che trasmetta i propri dati telemetrici ma che non sia in volo.

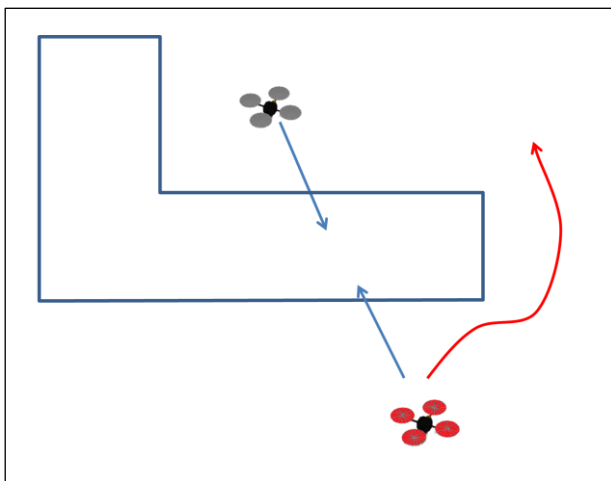


Figura 5. Situazione tipica di conflitto testata 'in vivo'

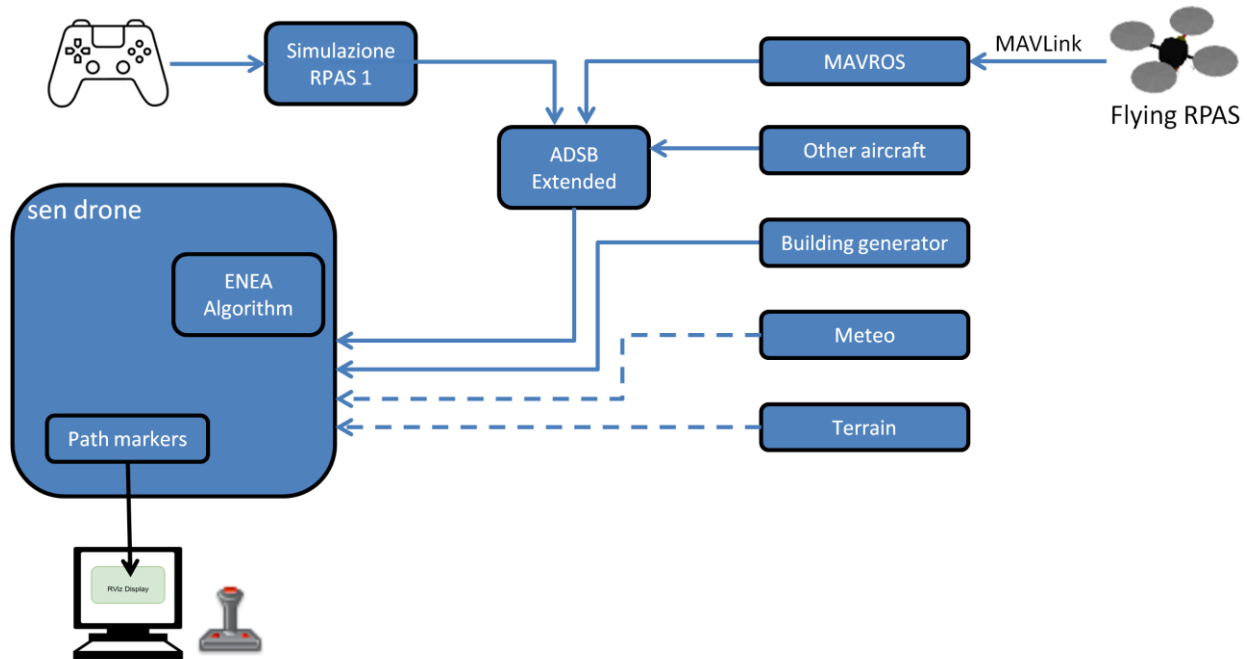
La tipica situazione di test è rappresentata in Figura 5, dove il drone di monitoraggio (con le eliche in rosso) deve evitare contemporaneamente l'edificio che sta misurando ed un altro drone in rotta di collisione con esso.



Figura 6. Esempio del display fornito dall' algoritmo: la mappa, l'edificio con il suo ingombro, la traiettoria suggerita

In Figura 6 è mostrato un esempio del suggerimento offerto al pilota in cui è possibile vedere l'area di volo (da Google Maps), con l'ingombro dell'edificio da monitorare ed evitare e la rotta sicura come una serie di *marker* verdi uniti da segmenti blu. Questi punti sono calcolati dall' algoritmo utilizzando una strategia di *fast forward* in cui ad ogni passo temporale nel futuro corrisponda un marker [2].

L'architettura generale del sistema è mostrata in Figura 7. Essa è sempre realizzata nel framework di ROS (Robot Operating System) in modo da poter procedere da quanto sviluppato nella precedente annualità (si veda [3]). Sono stati infatti sviluppati una serie di strumenti software per la traduzione tra coordinate geografiche e locali e per la gestione dei segnali radio provenienti dal drone reale.



**Figura 7. L'architettura generale del sistema**

Il drone reale comunica via radio tramite MAVLink [4], un protocollo di comunicazione ormai standard di fatto, al sistema a terra i propri parametri di volo (coordinate, altitudine, velocità, prua, etc.). Questi dati sono presi in carico dal modulo MAVROS (pacchetto SW di ROS), che li converte in un messaggio di tipo ADS-B che viene pubblicato sul topic `/adsb_extended`. Questo topic simula la presenza di un sistema di comunicazione basato su messaggi ADS-B, quelli cioè che vengono emessi dagli aerei di linea in broadcast ogni secondo, per segnalare la propria posizione, direzione e velocità [5]. L'utilizzo di un topic ROS per contenere i messaggi ADS-B consente di poter integrare altre sorgenti. In questo caso si sono integrati i dati provenienti dalla telemetria MAVLink di un drone reale, ma allo stesso modo è possibile integrare ad esempio dati reali di aerei in volo o di ulteriori droni.

I dati ADS-B dei droni presenti nel teatro delle operazioni vengono in seguito passati al modulo *sen drone* che li utilizza per il calcolo della traiettoria, tenuto conto della presenza degli edifici. Nella Figura 7 sono anche mostrati due moduli connessi a *sen drone* con linee tratteggiate: sono i moduli relativi al meteo ed al modello del terreno, al momento previsti ma ancora non implementati.

E' stata condotta una sessione sperimentale di test utilizzando come edificio 'ostacolo' l'F65 del Centro Ricerche Casaccia. Durante la sessione il pilota riceve suggerimenti su di un display come in Figura 6, mentre vola intorno all'edificio e, allo stesso tempo, viene disturbato da un secondo drone simulato, pilotato da un secondo pilota. Durante questi test i due droni sono stati mantenuti alla medesima altezza dal suolo, minore di quella dell'edificio, in modo da far sì che le situazioni di conflitto fossero le peggiori possibili.

I risultati di questo test sono stati positivi, ovvero assenza di situazioni di mancata separazione, confermando quanto risultante dai risultati dei test in ambiente simulato condotti durante il PAR 2017 [2] [3]. Va comunque sottolineata l'importanza di aver effettuato test in ambiente operativo reale che confermano a pieno le funzionalità dell'algoritmo.

### 2.3 Ottimizzazione delle procedure di calibrazione di sensori chimici

Lo studio di portabilità di ulteriori sensori chimici a bordo del drone nell’anno di attività 2016 (PAR2016) è passato attraverso un’analisi preliminare sulle possibili approcci e soluzioni tecniche che andassero a soddisfare i vari vincoli imposti [1]. In particolare nel corso della valutazione è stata individuata e valutata quale buon candidato l’infrastruttura Monica, un’infrastruttura sperimentale per la rilevazione pervasiva della qualità dell’aria. Nella successiva annualità del PAR2017 sono stati compiuti alcuni test sperimentali per interfacciare Monica con un sistema volante. In particolare si è voluta individuare una soluzione da seguire per realizzare un primo *test case* funzionante, anche a funzionalità limitate, che potesse dimostrarne la fattibilità tecnica operativa [2]. Scopo dell’attività descritta in questo documento ha riguardato l’ottimizzazione delle procedure di calibrazione del parco sensori di MONICA in laboratorio, risolvendo alcune problematiche riscontrate nel corso delle attività sperimentali.

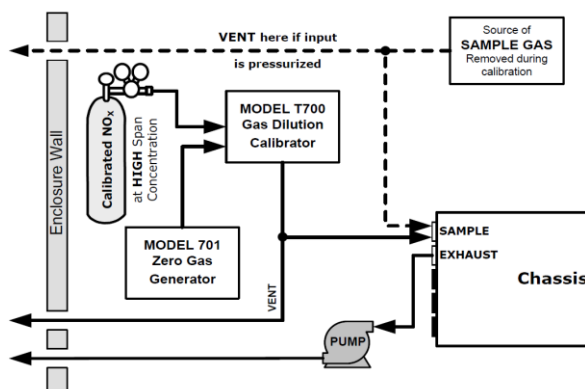


Figura 8. Analizzatore T200 inserito e relativo schema base di montaggio

Per quanto riguarda l’adattamento del sistema di calibrazioni sensori si consideri che l’attuale *array* sensoristico del dispositivo Monica è costituito da sensori elettrochimici (per gli inquinanti) ed “a circuito integrato” per l’umidità e temperatura. I primi necessitano di calibrazione/ricaribrazione periodica per mantenere la corretta accuratezza nelle rilevazioni, deteriorata da normali e documentati fenomeni di invecchiamento del sensore. Tale fase viene realizzata attualmente senza certificazione in un sistema costituito da una camera di condizionamento sensori e sistema di condizionamento e acquisizione di dati sensoriali senza utilizzare la piattaforma Monica e il suo *Backend* (MENA).

Esso è attualmente rappresentato da un sistema di laboratorio utilizzato per verificare calibrazioni di fabbrica ed eventualmente estrarre ulteriori curve descrittive (multivariata, *zero drift curve*, ecc.).

L'impianto permette di testare sensori di gas in un ambiente con atmosfera controllata. I sensori vengono inseriti in una camera di test in cui viene flussata un'atmosfera artificiale prodotta con flussi di bombole certificate opportunamente miscelati mediante l'uso di valvole e controllori di flusso anch'essi certificati (approccio di controllo a "catena aperta").

In particolare per quanto riguarda l'analisi  $\text{NO}_2$  (gas molto critico da dosare a basse concentrazioni) il nostro dispositivo va tarato tra 0 a 500 ppb (parts per billion, parti per miliardo) che è un tipico *range* di concentrazione a cui dovrebbero essere esposti nelle condizioni operative.

Grazie alla catena certificata delle concentrazioni in bombola, dei misuratori e dei controllori di flusso, le tarature dei dispositivi all' $\text{NO}_2$  raggiungono precisioni al di sotto dei 5 ppb. E' però necessario poter controllare e validare la calibrazione con un sistema di misura indipendente (sensore campione) con accuratezza e precisione nota. I misuratori a chemiluminescenza sono una tecnologia affermata e di riferimento per le misurazioni di  $\text{NO}_2$  in aria ambiente.

### 2.3.1 Realizzazione delle modifiche all'impianto di condizionamento e caratterizzazione sensori

Per quanto riguarda l'ottimizzazione dell'impianto sono state realizzate le modifiche necessarie proposte con particolare riferimento alla necessità di aumentare il livello di accuratezza nei processi di calibrazione/ricaribrazione periodica basandoli su un sistema di controllo "a catena chiusa" (sensore campione). Infatti la certificazione e i metodi di riferimento delle normative EN 14211 permettono di utilizzare in laboratorio uno strumento come il T200 [6] della Project Automation Spa per validare con la giusta accuratezza e precisione le calibrazioni effettuate.

Lo strumento è stato acquisito e inserito nell'impianto secondo lo schema consigliato dal manuale d'uso (Figura 8) e sono state effettuate tutte le operazioni di test e settaggi iniziali. Inoltre sono in studio tutte le azioni per predisporre il sistema T200 alle periodiche azioni di calibrazione interna.

### 2.3.2 Problematiche riscontrate nel corso delle attività sperimentali

Nello specifico utilizzo dei sensori, c'era la necessità di valutare l'impatto che l'impiego in veloce mobilità o il loro incapsulamento in griglie di protezione potesse avere sulla sensibilità all'analisi.

In particolare tale necessità è particolarmente sentita per gli analiti  $\text{O}_3$  e  $\text{NO}_2$  che, essendo gas poco stabili, tendono a decadere quando veicolati in camere chiuse/semichiuse o comunque a contatto con materiali.

E' stata quindi utilizzata una versione del dispositivo Monica il cui *array* di sensori fosse incapsulato in un *housing* metallico con parete a griglia (Figura 9) in modo che si potesse simulare un *worst case* di una soluzione definitiva drone-trasportata.



Figura 9. Versione del dispositivo Monica con *housing* sensori metallico



Sono state effettuate calibrazioni dell'array sensoriale a due analiti CO e NO<sub>2</sub> (molto diversi dal punto di vista della stabilità) nel range di interesse (range CO: 0-10 ppm, range NO<sub>2</sub>: 0-500 ppb). Nella tabella riepilogativa (Tabella 1) sono mostrate le sensibilità riscontrate (mv/ppb) dei tre sensori costituenti l'array (per alcuni dispositivi a nostra disposizione). In particolare i dati sono relativi al sensore CO sottoposto al flusso di CO e ai due sensori NO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub> sottoposti al flusso di NO<sub>2</sub>. Nella tabella risulta una sensibilità per l'NO<sub>2</sub> di entrambi i sensori NO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>, sensibilmente inferiori a quelle riscontrate nelle calibrazioni di fabbrica, mentre per il CO tale effetto risulta presente ma più limitato.

Questo ha suggerito, in prima ipotesi, che ci fosse una combinazione di probabili cause:

- Problemi fluidodinamici dovuto sia alla scarsa solubilità dell'NO<sub>2</sub> in aria (per la quale un azione meccanica di ventole produce un effetto di miscelazione del flusso) che alle perdite di carico introdotte dall'*housing* sul flusso (la sottostima sarebbe quindi dovuta a scarso flusso quindi allungamento dei tempi di salita che diventando di fatto superiori a quelli di rilevazioni tipici dell'applicazione)
- problemi legati alla scarsa stabilità dell'analita NO<sub>2</sub> dipendenti in qualche modo anche dal flusso (tipicamente maggiormente impattanti per range sui livelli più bassi dell'analita).

**Tabella 1. Sensibilità riscontrate e di fabbrica VS stato ventole**

	Rilevate			Produttore			
ID-Array	S_NO2	S_NO2+O3 with NO2	S_CO	S_NO2	S_NO2+O3 with NO2	S_CO	note
<b>20000029</b>	<b>0,08</b>	<b>0,154</b>	<b>0,188</b>	<b>0,26</b>	<b>0,42</b>	<b>0,27</b>	<b>ventole spente</b>
20000029	0,235	0,396	0,244	0,26	0,42	0,27	ventole accese
<b>20000034</b>	<b>0,135</b>	<b>0,255</b>	<b>0,19</b>	<b>0,22</b>	<b>0,4</b>	<b>0,28</b>	<b>ventole spente</b>
20000034	0,203	0,351	0,256	0,22	0,4	0,28	ventole accese
<b>20000024</b>	<b>0,085</b>	<b>0,116</b>	<b>0,206</b>	<b>0,24</b>	<b>0,39</b>	<b>0,25</b>	<b>ventole spente</b>
20000024	0,221	0,386	0,253	0,24	0,39	0,25	ventole accese
<b>20000033</b>	<b>0,131</b>	<b>0,242</b>	<b>0,19</b>	<b>0,23</b>	<b>0,38</b>	<b>0,26</b>	<b>ventole spente</b>
20000033	0,179	0,403	0,225	0,23	0,38	0,26	ventole accese
<b>20000027</b>	<b>0,127</b>	<b>0,246</b>	<b>0,2</b>	<b>0,22</b>	<b>0,35</b>	<b>0,27</b>	<b>ventole spente</b>
20000027	0,208	0,356	0,24	0,22	0,35	0,27	ventole accese

Inoltre dalla funzione di taratura esemplificata a seguire :

$$\text{Conc} = (1/S) * (\text{Output\_sensore\_mv} - \text{Output\_sensore\_zero\_mv}),$$

si può notare che a parità di livelli di rumore elettrico sull'output del sensore (dovuto tipicamente a rumore termico, non perfetto disaccoppiamento delle alimentazioni dello stadio di acquisizione e conversione ADC, rumore di *crossalking*, ecc.) l'incertezza della misura dell'analita viene notevolmente deteriorata a causa della componente aleatoria dell'incertezza di uscita del sensore (precisione dell'output) che viene riportata come 1/S sulla precisione della stima, quindi in qualche modo con effetto amplificante al diminuire della S (in pratica si verifica sia un peggioramento della precisione che un deterioramento del *LimitOfDetection* della stima della concentrazione a seguito di una sottostima di S).

Al di là di predisporre test specifici per comprendere se tutti gli effetti ipotizzati siano presenti e con quale peso, si è deciso di iniziare a compensare alcuni degli effetti utilizzando le ventoline applicate all'*housing*, verificando e provando a diverse velocità l'effetto che si produceva sulla sensibilità dell'analita.

Nei primi test si è utilizzato una velocità intermedia delle ventole (V3, su un range V0-V5) e il riscontro sulle sensibilità (soprattutto per i sensori sottoposti all'NO<sub>2</sub>) è stato positivo in quanto, dalla stessa tabella (Tabella 1), si nota come le sensibilità siano tornate a valori molto vicini a quelli di fabbrica.

C'è da segnalare anche che, piccole differenze nelle sensibilità riscontrate, sono legate soprattutto alla differente metodologia di calibrazione che la casa produttrice utilizza per i suoi sensori e dal differente

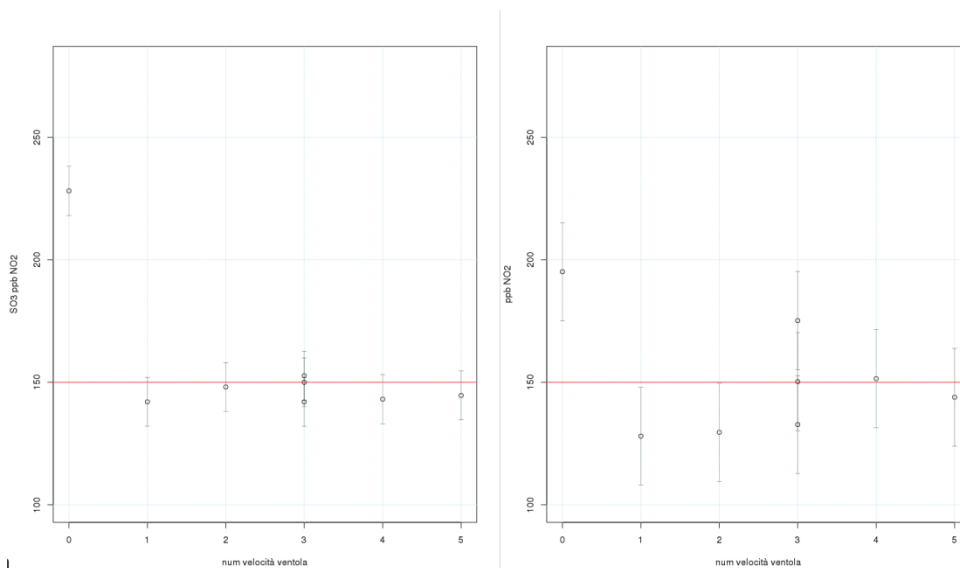


range di utilizzo degli stessi. Infatti la curva di taratura di tale tipologia di sensori risulta con una certa approssimazione lineare e quindi ci si aspettano lievi differenze della sensibilità calcolata su range differenti di utilizzo, quindi in porzioni differenti della curva.

Continuando l'analisi si è voluto verificare se ci fosse dipendenza della sensibilità dalla velocità delle ventole, situazione che avrebbe compromesso non poco l'utilizzo in mobilità senza appropriate azioni correttive.

Si è proceduto ad effettuare in camera condizionamento sensori un test specifico di rilevazione di 150 ppb di NO<sub>2</sub> al variare della velocità delle ventole (per il gas che presentava maggiormente l'anomalia e per i due sensori sensibili a tale analita con valore scelto nel range tipico di utilizzo).

I risultati sono mostrati nelle figure seguenti (Figura 10) per l'array sensoriale con ID20000030.



**Figura 10. Stima dell'analita NO<sub>2</sub> con sensori O<sub>3</sub>+NO<sub>2</sub> (a sinistra) e NO<sub>2</sub> (a destra) sottoposti a flusso variabile con di 150 ppb di NO<sub>2</sub>**

Esse mostrano chiaramente che una minima velocità delle ventole consente di ripristinare la corretta rilevazione dell'analita per entrambi i sensori rispetto all'analita NO<sub>2</sub> e che una velocità maggiore non altera sensibilmente tale ripristino ne produce nessuna altra alterazione significativa.

Ne deriva quindi la conclusione che in situazioni di forte mobilità, simulata con maggiore flusso delle ventole, il comportamento del sensore non viene sensibilmente alterato, ma l'assenza di un minimo flusso forzato in presenza di un *housing* anche semiaperto può determinare una non corretta stima dell'analita in condizioni di drone fermo con scarsa ventosità diretta alle aperture.

Di qui la necessità nella versione finale del prototipo di garantire un minimo flusso forzato tarato sull'*housing* finale che prevenga tale anomalo comportamento in alcune situazioni operative.

### 3 Conclusioni

In questo report sono state presentate le attività del PAR 2018 relative al sotto obiettivo "Monitoraggio aereo dello smart district" dell'obiettivo "Sicurezza infrastrutture critiche e monitoraggio aereo dello Smart District" del progetto "Sviluppo di un modello integrato di Smart District urbano". La durata del presente PAR è stata di tre mesi.

Le attività relative ai precedenti Piani Annuali di Realizzazione (PAR 2016 e PAR 2017) hanno portato alla realizzazione di un dimostratore per il monitoraggio energetico degli edifici energivori e per quello ambientale basato sulla tecnologia dei droni. Nel PAR 2017 sono stati sviluppati algoritmi per l'elaborazione

dei dati (soprattutto iconografici) per realizzare modelli 3D, è stato sviluppato un algoritmo per l'ausilio al pilota, si è considerato l'allargamento del *pool* di sensori chimici del drone ed è stata eseguita una serie di prove sperimentali in campo.

Nel corso del PAR 2018 sono state realizzate attività riguardanti l'acquisizione e l'elaborazione di dati provenienti dalla piattaforma volante teleguidata da terra, utilizzata per il monitoraggio di una sottostazione elettrica. Altro filone ha riguardato il test operativo dell'algoritmo di supporto al pilota del drone che suggerisce traiettorie di volo sicure, ovvero che mantengano distanze di sicurezza con la struttura monitorata ed con eventuali altri sistemi RPAS (Remotely Piloted Aerial System, droni), sviluppato nell'annualità precedente. Queste attività di test sono state svolte in ambiente operativo reale diversamente da quanto svolto nella precedente annualità, dove erano state condotte all'interno di una simulazione.

Eventuali sviluppi futuri delle attività possono essere rappresentate da sviluppi dell'algoritmo di ausilio al pilota introducendo ulteriori elementi di rischio quali il modello digitale del terreno (DTM, Digital Terrain Model) e/o il modello 3D dell'area di interesse (DSM, Digital Surface Model); parallelamente è possibile studiare ulteriori configurazioni di conflitto oltre a quelle già sperimentate.

Sono altresì proseguite le attività per equipaggiare il drone con ulteriori sensori chimici provenienti da un sistema portatile di misura recentemente sviluppato in ENEA con finalità simili. In particolare le attività sono state dirette all'ottimizzazione delle procedure di calibrazione dei sensori chimici per la risoluzione di alcune problematiche riscontrate nel corso delle attività sperimentali del PAR2017.

Il primo ed il secondo argomento sono stati principalmente seguiti dal Laboratorio di Robotica dell'ENEA (DTE-SEN-IDRA) ed il terzo dal Laboratorio ENEA Dispositivi Innovativi (DTE-FSN-DIN).

Il presente trimestre di attività è quello conclusivo del periodo complessivo di attività del Progetto che, per ciò che riguarda le attività del sottoprogetto d.2 "Sicurezza infrastrutture critiche e monitoraggio aereo dello Smart District", si è articolato nelle annualità 2016, 2017 e nel trimestre 2018.

Qui di seguito vengono riassunti i principali risultati ottenuti al termine dell'intero periodo:

- realizzazione di un prototipo volante di monitoraggio completo del suo *payload* sperimentale;
- progettazione e sviluppo del SW di gestione del sistema volante e delle comunicazioni con esso;
- addestramento piloti;
- progettazione e sviluppo interfaccia con il DSS (sotto-obiettivo d.1);
- sviluppo di un simulatore robotico per lo studio delle missioni;
- modellazione degli inquinanti atmosferici a piccola scala con modelli matematici e DEM (Digital Elevation Model);
- elaborazione dei dati iconici per una loro migliore fruizione: modelli 3D da Structure from Motion;
- studio e realizzazione di un algoritmo di supporto al pilota per evitare situazioni di conflitto con altri velivoli o edifici;
- studio di ulteriori sensori chimici e di polveri sottili come *payload* e problematiche relative;

Le attività hanno dunque portato alla realizzazione di un dimostratore che è stato utilizzato in una serie di campagne di misura sia su edifici che su specifici elementi del sistema elettrico.

E' importante osservare qui che l'analisi dei casi di studio effettuata ha messo in luce possibili utilizzi del sistema di monitoraggio aggiuntivi a quelli per i quali il sistema è stato disegnato. Infatti oltre al monitoraggio energetico degli edifici, il sistema di monitoraggio può essere utile alla mitigazione del rischio nell'analisi delle condizioni di esercizio di sottosistemi della rete elettrica quali le sottostazioni di media tensione. In altri termini, l'insieme delle misure effettuate e processate, soprattutto quelle termografiche, di concerto con i modelli di analisi sviluppati nel sotto obiettivo d.1 possono rappresentare un valido

strumento di supporto alle decisioni che competono agli enti gestori, chiamati sia ad affrontare situazioni di emergenza, ma soprattutto ad ottimizzare le strategie e le procedure di manutenzione preventiva.

Il rischio di blackout e di abbassamenti di tensione sulla rete di distribuzione dell'energia elettrica è in aumento a causa dell'invecchiamento dell'infrastruttura. L'utilizzo di un sistema di monitoraggio quale quello proposto può portare ad evidenti risparmi, soprattutto in termini di disservizi per l'utente finale e, allo stesso tempo, di contenimento dei costi sul lato dei gestori delle utilities. Un monitoraggio che funga da *early-warning*, ovvero che si accorga di un problema sul nascere può evitare disservizi importanti di edifici strategici (ad esempio quelli del sistema di protezione civile), di strutture bancarie, di sistemi di sicurezza, di impianti di produzione, della refrigerazione di alimenti, di reti di comunicazione e di sistemi di controllo del traffico.

Ciò si traduce in benefici per gli utenti del sistema elettrico: la possibilità di poter misurare eventuali dispersioni energetiche da edifici rappresenta un ovvio beneficio diretto, mentre la possibilità di contribuire alla mitigazione del rischio nell'esercizio del sistema elettrico rappresenta un beneficio indiretto, in quanto consente una più efficace manutenzione preventiva degli apparati, diminuendo l'eventuale tempo di fermo, ma, allo stesso tempo, diminuisce il rischio di danni legati a caduta di sistemi vitali quali le infrastrutture critiche non direttamente facenti parte del sistema elettrico, ma dal sistema elettrico alimentate.

## 4 Riferimenti bibliografici

- [1] S. Taraglio, L. Blasi, G. Cupertino, C. Moriconi, V. Nanni, S. De Vito, F. Formisano, G. Zanini, F. Russo, M. Villani e L. Vitali, «Sviluppo di un sistema di monitoraggio aereo per lo smart district,» 2017. RdS/PAR2016/021.
- [2] S. Taraglio, L. Blasi, G. Cupertino, C. Moriconi, V. Nanni, S. D. Vito e F. Formisano, «Sistema di monitoraggio aereo per lo smart district: elaborazione dati, ausilio al pilota, sviluppo sensori,» 2018. RdS/PAR2017/062.
- [3] M. Pollino, E. Caiaffa, G. D'Agostino, A. D. Nicola, A. D. Pietro, G. Fattoruso, L. L. Porta, V. Rosato, A. Tofani, G. Vicoli e M. Villani, «La piattaforma DSS di tipo GIS-based per l'analisi del rischio e della sicurezza delle infrastrutture critiche dello Smart District,» 2018, Report RdS/PAR2017/061.
- [4] M. Pollino, G. D'Agostino, A. D. Nicola, A. D. Pietro, G. Fattoruso, L. L. Porta, V. Rosato, A. Tofani e M. Villani, «Realizzazione del DSS per la sicurezza delle Infrastrutture Critiche (CI) del Distretto,» 2018, Report RdS/PAR2018/030.
- [5] S. Betti e S. Chiesa, «Studio e sviluppo di algoritmi per l'ausilio al pilota e l'elaborazione dei dati sensoriali di bordo,» 2018, Rds/PAR2017/065.
- [6] «Wikipedia - MAVLink,» [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/MAVLink>. [Consultato il giorno 28 9 2018].
- [7] «ADS-B - Wikipedia,» [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/ADS-B>. [Consultato il giorno 28 9 2018].
- [8] «Manuale operativo Teledyne Model T200,» [Online]. Available: <http://www.teledyne-api.com/prod/Downloads/06858E%20-%20MANUAL,%20T200.pdf>. [Consultato il giorno 21 12 2018].

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

I seguenti acronimi sono presenti nel testo e sono qui elencati in ordine di apparizione.

**PAR** Piano Annuale Realizzativo.

**RPAS** Remotely Piloted Aerial Systems. Sistemi aerei a pilotaggio remoto: i droni.

**DSS** Decision Support System. Sistema di support alle decisioni: un sistema software volto alla presentazione di dati complessi, usualmente in modo georeferenziato.

**SfM** Structure from Motion. Struttura da movimento: algoritmica per la ricostruzione di modelli 3D.

**PLY** PoLYgon file format. Formato di file poligono: formato di file per la descrizione di modelli 3D.

**HD** High Definition. Alta definizione: usualmente video digitali con 1920x1080 pixel.

**MT** Media Tensione.

**ROS** Robot Operating System. Sistema Operativo per Robot: un *middleware* che fornisce una serie di strumenti informatici per la realizzazione di software per la programmazione e la gestione di robot.

**ADS-B** Automatic Dependent Surveillance – Broadcast: tecnologia di sorveglianza nella quale un aereo determina la propria posizione e la trasmette via radio, permettendo il tracking.

**MONICA** MONitoraggio Cooperativo della qualità dell'Aria: sistema per il monitoraggio chimico ambientale.

**MENA** il server di *backend* del sistema Monica di monitoraggio chimico ambientale.

**PPB** parts per billion: parti per miliardo.

## 6 Indice delle figure

Figura 1. Il modello 3D visuale della sottostazione elettrica.....	7
Figura 2. Due immagini termiche della sottostazione elettrica monitorata .....	7
Figura 3. Il modello 3D nell'infrarosso termico della sottostazione elettrica .....	8
Figura 4. Il modello 3D della sottostazione elettrica nel sistema DSS.....	8
Figura 5. Situazione tipica di conflitto testata ‘in vivo’ .....	10
Figura 6. Esempio del display fornito dall’algoritmo: la mappa, l'edificio con il suo ingombro, la traiettoria suggerita .....	10
Figura 7. L'architettura generale del sistema .....	11
Figura 8. Analizzatore T200 inserito e relativo schema base di montaggio .....	12
Figura 9. Versione del dispositivo Monica con <i>housing</i> sensori metallico .....	13
Figura 10. Stima dell’analita NO <sub>2</sub> con sensori O <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub> (a sinistra) e NO <sub>2</sub> (a destra) sottoposti a flusso variabile con di 150 ppb di NO <sub>2</sub> .....	15