

INAIL

Quaderni di ricerca

CP-SEC: Sistema Cyber-Fisico per la sicurezza dei lavoratori in presenza di sostanze pericolose

Andrea Abrardo, Patrizia Agnello, Silvia M. Ansaldi, Laura Belli,
Paolo Bragatto, Luca Davoli, Francesca M. Fabiani, Gianluigi Ferrari,
Lorenzo Parri

22

maggio 2023

INAIL
Quaderni di ricerca

CP-SEC: Sistema Cyber-Fisico per la sicurezza dei lavoratori in presenza di sostanze pericolose

Andrea Abrardo, Patrizia Agnello, Silvia M. Ansaldi, Laura Belli,
Paolo Bragatto, Luca Davoli, Francesca M. Fabiani, Gianluigi Ferrari,
Lorenzo Parri

numero 22 - maggio 2023

I *Quaderni di ricerca* dell'Inail sono lo strumento a disposizione dei ricercatori e dei ruoli professionali dell'Istituto per rendere pubblici i risultati più rilevanti delle loro attività; accolgono anche contributi di ricercatori esterni, che partecipano ai progetti dell'Inail.

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

I *Quaderni* sono disponibili online all'indirizzo www.inail.it.

Comitato di redazione: Biancamaria Pietrangeli, Franco Bettoni,
Benedetta Persechino, Patrizio Rossi

Segreteria di redazione: Cristina Francesca Giombini

Inail - Piazzale Giulio Pastore, 6 | 00144 Roma

ISBN 978-88-7484-807-2

Stampato presso la Tipografia Inail - Milano, ottobre 2023

CP-SEC: Sistema Cyber-Fisico per la sicurezza dei lavoratori in presenza di sostanze chimiche pericolose

Andrea Abrardo, Patrizia Agnello, Silvia M. Ansaldi, Laura Belli, Paolo Bragatto, Luca Davoli, Francesca M. Fabiani, Gianluigi Ferrari, Lorenzo Parri¹

Sommario - Il presente contributo rientra nei risultati del progetto “CP-SEC Cyber-Fisico per la sicurezza in stabilimenti a rischio incidenti rilevanti con integrazione di tecnologie di localizzazione di persone e mezzi e di sistemi di sensori distribuiti” finanziato da Inail nell’ambito dei bandi di ricerca in collaborazione (BRiC). Il progetto, svoltosi tra ottobre 2020 e dicembre 2022, ha avuto lo scopo di realizzare un sistema per la sicurezza dei lavoratori che operano, anche da soli, in ambienti complessi, al chiuso o all’aperto, caratterizzati dalla presenza di strutture, macchinari ed impianti, di gas o vapori pericolosi, nonché dalla eventuale carenza di ossigeno. Il sistema segnala tempestivamente eventuali rilasci di sostanze pericolose, anche localizzandoli, consentendo di minimizzare le conseguenze per i lavoratori e per l’ambiente. Il sistema realizzato è destinato principalmente agli stabilimenti soggetti al D.Lgs 105/2015, dove per la presenza di sostanze pericolose in quantitativi considerevoli è possibile l’accadimento di “incidenti rilevanti”, con coinvolgimento di aree anche molto estese; ma è adatto, in generale, per tutti quegli ambienti lavorativi nei quali la eventuale presenza/fuoriuscita di gas risulti pericolosa per la sicurezza del singolo operatore. Con il progetto CP-SEC è stata sviluppata una innovativa architettura per la sicurezza in stabilimenti a rischio di incidenti rilevanti, inserendo nuove funzionalità che si possono generalmente ricondurre all’integrazione di sistemi Cyber-Fisici, includendo funzioni di rilevamento ed elaborazione delle informazioni, in grado di interagire in modo continuo con il sistema fisico in cui operano. Più nello specifico, sono state progettate, sviluppate e testate tecnologie di localizzazione innovative basate sullo sviluppo di un sistema di navigazione ibrido inerziale/wireless capace di raggiungere un’elevata accuratezza anche in ambiente chiuso (*indoor*), e un sistema di sensoristica distribuita per il rilevamento e la comunicazione di eventi potenzialmente dannosi (quali fuoriuscite di sostanze pericolose), attraverso l’uso di sensori commerciali e di sensori prototipali appositamente sviluppati. Le tecnologie sviluppate sono quindi integrate seguendo il paradigma Industria 4.0. In altri termini, il sistema proposto non si esaurisce con la dislocazione di un numero consistente di sensori sul campo, ma mira piuttosto a rappresentare un importante tassello di un più vasto ecosistema tecnologico in cui tutti i processi siano collegati al fine di rendere dinamico il rilevamento di condizioni pericolose.

Parole Chiave: Sistemi CPS, Pericolo di Incidente Rilevante, Industria 4.0; Sostanze Pericolose

¹Questo quaderno riporta i risultati relativi al Progetto “CP-SEC: Sistema Cyber - Fisico per la sicurezza in stabilimenti a rischio incidenti rilevanti con integrazione di tecnologie di localizzazione di persone e mezzi e di sistemi di sensori distribuiti” - Bando Ricerche in Collaborazione (BRiC 2019) dell’INAIL, Piano Attività di ricerca 2019-2021, TEMATICA ID 2 “Approcci integrati e metodologie innovative per la prevenzione del fenomeno infortunistico anche attraverso l’analisi dei “near miss”.

Gli autori per INAIL DIT sono: Francesca M. Fabiani (Referente scientifico), Patrizia Agnello, Paolo Bragatto e Silvia M. Ansaldi; per Università di Siena DIISM: Andrea Abrardo (responsabile scientifico del progetto) e Lorenzo Parri; per Università di Parma DIA: Gianluigi Ferrari (responsabile dell’unità operativa), Laura Belli e Luca Davoli.

Si ringrazia Petrolgas S.r.l. di Lastra a Signa (Firenze) per la collaborazione al progetto.

Indice degli argomenti

Premessa	7
Acronimi e definizioni	8
1. Contesti di riferimento	10
2 Definizione dei requisiti funzionali e dell'architettura del sistema CP-SEC	11
2.1 Definizione dei requisiti funzionali	11
2.2 Definizione dell'architettura della rete di telecomunicazione per la trasmissione dati nel cloud	13
3 Sviluppo di sistemi sensoriali distribuiti per la rilevazione di sostanze chimiche e relativo invio dei dati	16
3.1 Scelta dei sensori chimici attraverso una campagna di caratterizzazione in laboratorio	16
3.2 Sviluppo del sistema sensoriale per i composti chimici target	24
3.3 Test e verifica delle funzionalità del sistema sviluppato	27
3.4 Studio affidabilistico dell'elettronica sviluppata e integrazione dei sistemi sensoristici con i sistemi di comunicazione	29
4. Sviluppo di sistemi sensoriali distribuiti per la localizzazione di persone e mezzi e relativo invio dei dati	31
4.1 Sviluppo di sistemi di localizzazione ibridi	31
4.2 Sistema di localizzazione per lo scenario <i>indoor</i>	32
4.3 Sistema di localizzazione per lo scenario <i>outdoor</i>	43
4.4 Prototipo di localizzazione integrato	52
5. Identificazione delle interfacce di comunicazione dei sistemi sensoriali sviluppati	52
5.1 Valutazione delle prestazioni di reti <i>wireless</i> eterogenee per la trasmissione dati verso il server	53
5.2 Integrazione dei sistemi sensoristici con i sistemi di comunicazione	54
6 Sviluppo di una nuova generazione di unità di supervisione di campo	55
6.1 Definizione dell'architettura e delle funzionalità dell'unità di supervisione di campo	55
6.2 Sviluppo software della unità di supervisione di campo	56
6.3 Integrazione di sistemi di allarme con l'unità di supervisione di campo	59
6.4 Verifica sperimentale (TRL5)	59
7. Integrazione dei Cyber Physical Systems nei sistemi di gestione della sicurezza	66
8 Conclusioni	68

Premessa

Negli ultimi anni, si è assistito a una sempre maggiore diffusione di innovazioni tecnologiche nel mondo dell'industria che vanno sotto il generico nome di industria 4.0 [Che-017]. Essa si riferisce in particolare ad una estensiva digitalizzazione dei processi industriali basata su nuove tecnologie che includono i Cyber Physical Systems (CPS) e i sistemi Internet of Things (IoT), con l'obiettivo di distribuire l'intelligenza e l'abilità di comunicare alle singole macchine e ai loro componenti. In questo ambito, si intravedono notevoli potenzialità nel campo della sicurezza e della prevenzione di incidenti in ambienti di lavoro date da: (i) tecnologie sensor-based che aiutino nel rilevamento dinamico di condizioni pericolose; (ii) tecniche di video sorveglianza per il controllo della sicurezza; (iii) uso di tecnologie IoT per il monitoraggio di vaste aree con possibilità di utilizzare strumenti di data processing capaci di prevedere possibili eventi catastrofici utilizzando modelli predittivi di analisi dei dati acquisiti [Bot-015].

Nell'ambito dei cantieri mobili e della corretta gestione della movimentazione dei mezzi, l'attenzione delle imprese si è recentemente focalizzata in particolare sulle tecnologie di localizzazione o location-based targeting. Queste tecnologie hanno portato alla realizzazione di alcuni sistemi di controllo e monitoraggio attualmente presenti sul mercato, essenzialmente volti al controllo della posizione in tempo reale degli assets e degli addetti all'interno di aree delimitate; si vedano a titolo di esempio le soluzioni proposte in [Acc-022, Ubi-022].

Il progetto CP-SEC ha avuto in primo luogo l'obiettivo di sviluppare una innovativa architettura per la sicurezza in stabilimenti a rischio di incidenti rilevanti (soggetti al d.lgs. 105/2015 - Seveso III), inserendo nuove funzionalità che si possono generalmente ricondurre all'integrazione di sistemi Cyber-Fisici, includendo funzioni di rilevamento ed elaborazione delle informazioni, in grado di interagire in modo continuo con il sistema fisico in cui operano. Più nello specifico, la progettazione, lo sviluppo e la verifica sperimentale di tecnologie di localizzazione innovative basate sullo sviluppo di un sistema di navigazione ibrido inerziale/wireless capace di raggiungere un'elevata accuratezza anche in ambiente chiuso (*indoor*), e un sistema di sensoristica distribuita per il rilevamento e la comunicazione di eventi potenzialmente dannosi (quali fuoriuscite di sostanze pericolose), attraverso l'uso di sensori commerciali e di sensori prototipali appositamente sviluppati.

Le tecnologie sviluppate sono quindi integrate seguendo il paradigma Industria 4.0. In altri termini, il sistema proposto non si esaurisce con la dislocazione di un numero consistente di sensori sul campo, ma mira piuttosto a rappresentare un importante tassello di un più vasto ecosistema tecnologico in cui tutti i processi siano collegati al fine di rendere dinamico il rilevamento di condizioni pericolose.

Le potenzialità di un sistema cyber-fisico possono essere preziose nella gestione dei rischi negli stabilimenti soggetti al d.lgs. 105/2015 (Seveso III), generalmente ambienti al chiuso (*indoor*) e all'aperto (*outdoor*), nei quali il rilascio di sostanze pericolose presenti in grandi quantità può provocare gravi conseguenze.

Gli scenari incidentali connessi al rilascio di sostanze pericolose includono incendio, esplosione. Il rilascio di sostanze pericolose può essere causato, per esempio, da rotture di tubazioni e/o macchinari (pompe, compressori), difetti di tenuta, sovrariempimento dei serbatoi, errori nella fase di movimentazione, di invio di sostanze a recipienti già pieni, di carico dei serbatoi con sostanze diverse e incompatibili fra loro, rotture di valvole di respirazione dei serbatoi, cadute accidentali o scontri tra mezzi, e più in generale sversamenti di fusti [Ela-013].

In questo ambito, il compito del gestore dello stabilimento è essenzialmente quello di effettuare un'analisi dei rischi connessi all'individuazione dei possibili scenari incidentali, ovvero di effettuare una valutazione a priori dei rischi con l'individuazione delle misure preventive e protettive da adottare e da inserire in opportuna documentazione.

Tuttavia, gli scenari di riferimento prevedono situazioni fortemente dinamiche e variabili, che difficilmente possono essere fronteggiate da un approccio interamente "a priori". Un tipico esempio di scenario con forti variabilità è rappresentato dalla movimentazione delle merci, laddove la presenza contemporanea di persone e mezzi in movimento con trasporto di materiale pericoloso comporta un potenziale aumento del rischio incidentale.

Il fatto che l'idea progettuale sia nata in un contesto Seveso, non deve circoscrivere l'applicazione del sistema agli stabilimenti a rischio di incidenti rilevanti. Il sistema CP-SEC può essere impiegato nei contesti più svariati, caratterizzati dalla presenza di sostanze pericolose.

Per lo sviluppo del progetto sono stati individuati degli scenari di riferimento ricavati da un'analisi preliminare condotta in collaborazione con la ditta Petrolgas relativamente alle attività di movimentazione e stoccaggio di Gas di Petrolio Liquefatto (GPL) sia sfuso (autocisterne) che in bombole, e a supporto dei Piani di emergenza esterno e interno.

La verifica preliminare delle funzionalità del sistema è avvenuta presso il sito di Monteporzio Catone, all'interno del Centro Ricerche Inail. Il sito, seppure in scala ridotta, è adeguato a rappresentare un ambiente complesso, con la presenza di un discreto numero di macchinari, strutture ed attrezzature sia all'aperto che all'interno, nonché di sostanze chimiche anche in bombole. Anche se il pericolo chimico è basso in considerazione della esigua quantità di sostanze chimiche presenti, il sito è adatto alla dimostrazione del sistema.

Come verrà discusso nel dettaglio del presente documento, le prove di funzionamento eseguite nei diversi siti pilota, quello di Monteporzio in particolare, sono state pensate per dimostrare l'applicabilità del sistema realizzato in diversi contesti produttivi, scalando dal sito complesso con livello di rischio molto alto, il sito Seveso appunto, a siti complessi con livello di rischio più basso per i minori quantitativi di sostanze chimiche presenti, le piccole chimiche ad esempio. L'applicabilità del sistema è anche possibile nei settori della logistica e della distribuzione, nei quali, situazioni pericolose possono individuarsi anche nei casi nei quali un lavoratore operi in solitaria in ambienti complessi caratterizzati dalla presenza di un gran numero di oggetti, strutture e attrezzature.

Acronimi e definizioni

ABS - Acrilonitrile Butadiene Stirene: materiale termoplastico amorfo.

API - Application Programming Interface: *software* di collegamento che permette di collegare ed integrare applicativi diversi ed inizialmente indipendenti.

BLE - Bluetooth Low Energy: tecnologia di trasmissione radio a basso consumo energetico.

CLI - Command Line Interface: interfaccia a riga di comando, ovvero un'interfaccia basata su comandi testuali per eseguire azioni su un sistema informatico.

COTS - Commercial Off-The-Shelf: componenti hardware e/o *software* disponibili sul mercato ed acquistabili da parte di aziende di sviluppo o privati per l'utilizzo in progetti o attività di loro interesse.

CPS - Cyber Physical System: Sistemi informatici intelligenti in cui un sistema fisico viene controllato o monitorato da algoritmi e componenti *software*.

DPI - Dispositivo di Protezione Individuale: dispositivo progettato e fabbricato per essere indossato o tenuto da una persona per proteggersi da uno o più rischi per la sua salute o sicurezza.

FPMH - Failure Per Million of Hours: tasso di guasto espresso come numero di guasti per milione di ore.

GNSS - Global Navigation Satellite System: sistema di geo-radiolocalizzazione utilizzato per la navigazione globale terrestre, marittima o aerea, che utilizza una rete di satelliti artificiali in orbita e pseudoliti.

GPL - Gas di Petrolio Liquefatto: miscela di idrocarburi (principalmente propano e butano) derivanti dalla produzione di gas naturale e dalla raffinazione del petrolio grezzo, che si presentano come gas a pressione atmosferica, e diventando liquidi a temperatura ambiente se sottoposti ad una certa pressione.

HTTP - HyperText Transfer Protocol: protocollo a livello applicativo usato come principale sistema per la trasmissione di informazioni in ambito web (in un'architettura di tipo *client-server*).

IMU - Inertial Measurement Unit: dispositivo elettronico generalmente dotato di accelerometro, giroscopio e talvolta magnetometro che permette di monitorare la dinamica di un oggetto o di una persona in movimento.

IoT - Internet of Things: tecnologie digitali per connettere in rete oggetti e dispositivi che sono quindi in grado di scambiare dati e informazioni.

LEL - Low Explosive Level: Indica la minima concentrazione di un composto infiammabile in una miscela contenente aria entro cui, se la miscela aria-vapore o gas infiammabile è opportunamente innescata (ad esempio da una scintilla), si verifica l'accensione della miscela.

LoRa - Long Range: tecnologia di comunicazione radio punto punto a lungo raggio basata su una modulazione di frequenza a spettro espanso derivata dalla tecnologia di Chirp Spread Spectrum (CSS).

LoRaWAN - Long Range Wide Area Network: un protocollo di rete LPWA (Low Power, Wide Area) basato su LoRa e progettato per connettere in modalità wireless oggetti alimentati a batteria a Internet.

MQTT - Message Queuing Telemetry Transport: protocollo standard di trasmissione dati TCP/IP basato su un modello di comunicazione di tipo *publish-subscribe*, principalmente utilizzato per lo scambio di informazioni tra macchine (o dispositivi IoT).

MTBF - Mean Time Between Failures: indicatore e parametro di affidabilità che descrive il tempo medio fra i guasti di un sistema, ovvero il tempo medio atteso tra l'inizio di un guasto e l'inizio del guasto successivo.

Nb-IoT - Narrowband Internet of Things: protocollo standard per la comunicazione radio LPWAN (Low Power Wide Area Network) basata sulla rete cellulare.

NMEA - National Marine Electronics Association: standard di comunicazione usato dai per comunicare i dati di posizione e tempo con sistemi di tipo satellitare.

RBD - Reliability Block Diagram: diagramma di analisi utilizzato per valutare l'affidabilità di un sistema complesso.

REST - REpresentational State Transfer: insieme di principi architettonici in ambito informatico per la trasmissione di dati tramite HTTP che non prevede il concetto di sessione (*stateless*).

RTCM3 - Radio Technical Commission for Maritime Services: protocollo che definisce il formato dati per lo scambio di informazioni GPS differenziali.

RTK - Real Time Kinematics: tecnica specifica per la localizzazione satellitare in grado di produrre

risultati precisi al centimetro, che prevede la misurazione dei dati satellitari rispetto a una stazione di terra, per ottenere informazioni precise in tempo reale.

UHF - Ultra High Frequency: indica i segnali a radiofrequenza trasmessi nella banda che va da 300 MHz a 3 GHz, ossia lunghezza d'onda tra 1 e 0,1 m.

UWB - Ultra WideBand: tecnologia radio sviluppata per trasmettere e ricevere segnali mediante l'utilizzo di impulsi di energia a radiofrequenza di durata temporale estremamente ridotta (da poche decine di picosecondi a qualche nanosecondo) e con occupazione spettrale molto ampia.

1. Contesti di riferimento

Il d.lgs. 105/2015 - Seveso III, si applica agli “stabilimenti”, definiti come aree delimitate, soggetti al controllo di un gestore, dove sono presenti sostanze classificate come pericolose in quantitativi superiori a limiti fissati dalla stessa legislazione.

In Italia sono presenti circa mille stabilimenti nei quali sono presenti sostanze pericolose, considerando sia quelli di soglia inferiore (che quindi non ricadono sotto Seveso) che quelli di soglia superiore.

Occorre comunque considerare che le sostanze pericolose, possono uscire dai recinti dello stabilimento, trasportate e distribuite con varie modalità. Si configurano, quindi, anche fuori dallo stabilimento, situazioni pericolose per le persone.

Al di fuori degli “stabilimenti Seveso”, le conseguenze di rilascio di sostanze pericolose sono sicuramente meno disastrose rispetto a quelle possibili all'interno di uno “stabilimento Seveso”, in particolare per i non addetti, ma non per i singoli lavoratori, che restano comunque esposti ai rischi dovuti ai rilasci, come pure eventuali altre persone nelle distanze più immediate.

Un esempio può venire dalla filiera del GPL: le raffinerie dove viene prodotto ricadono sotto la Seveso, come pure i depositi e gli impianti di imbottigliamento, ma occorre considerare anche i rischi nel trasporto fino all'utilizzatore finale, la distribuzione sul territorio, con le relative operazioni di scarico, condotte da un operatore singolo.

Un ulteriore esempio viene per i gas tecnici, gli impianti di produzione dei quali ricadono sotto Seveso, ma la capillare rete di distribuzione, che raggiunge i vari utilizzatori, non è ovviamente sotto Seveso.

I contesti rischiosi per la presenza di sostanze pericolose sono i più disparati. Solo per fare un esempio nell'industria enologica si utilizza anidride solforosa in bombole. Il GPL sopra citato non è assolutamente tossico, ma è comunque pericoloso in caso di confinamento in aree congestionate, per la formazione di atmosfere potenzialmente esplosive.

Anche dove non sono utilizzati, gas pericolosi possono formarsi da fenomeni chimici indesiderati o da combustione, con pericoli per gli addetti. In tutti questi ambiti lavorativi “fuori Seveso” trova applicazione il D. Lgs 81/2008.

Il titolo IX del d.lgs. 81/2008 è dedicato alle sostanze pericolose. All'interno del titolo IX, il capo I, con 12 articoli è interamente dedicato alla protezione dalle sostanze chimiche. In particolare, può essere pertinente l'art. 225 che prevede misure specifiche di protezione individuali e collettive per prevenire anche l'esposizione accidentale alle sostanze pericolose e l'art. 226 che riguarda i possibili incidenti, inclusi i rilasci, dalle cui conseguenze vanno protetti i lavoratori. A differenza della Seveso l'adozione di un sistema di gestione della sicurezza formalizzato non è obbligatoria, ma è rac-

comandata attraverso meccanismi di “soft law”, ovvero norme prive di efficacia vincolante diretta. Il fatto che l’idea progettuale sia nata in un contesto Seveso, non deve quindi circoscrivere l’applicazione del sistema agli stabilimenti a rischio di incidente rilevante.

2. Definizione dei requisiti funzionali e dell’architettura del sistema CP-SEC

2.1 Definizione dei requisiti funzionali

Per la definizione dei requisiti funzionali del sistema, è stata necessaria una prima fase di analisi di scenari di riferimento. A tale scopo è stata coinvolta l’azienda Petrolgas di Lastra a Signa (Firenze). Dall’incontro con lo stakeholder Peltrolgas, azienda che si occupa dello stoccaggio e della distribuzione di GPL, sono emersi dei possibili scenari per la realizzazione di un sistema per aumentare la sicurezza dell’impianto e degli operatori.

L’impianto possiede una serie di depositi per lo stoccaggio del GPL e aree per lo scaricamento ed il caricamento su autocarri. Nelle zone a più alto rischio di perdite di gas sono posizionati, come richiesto dalle normative, una serie di sensori. Per quanto riguarda le valvole sulle linee gas, sono presenti sia valvole automatiche che manuali. Quelle automatiche sono comandate dal sistema di allarme o altri apparati di sicurezza, mentre quelle manuali sono controllate solo dall’operatore. È stata considerata anche l’opportunità di monitorare la posizione di queste ultime valvole ma questa azione sembra essere troppo invasiva sull’impianto. Si è quindi cercata una soluzione che potesse aumentare il livello di sicurezza dell’impianto e degli operatori con modalità il meno possibile invasive sui sistemi esistenti.

Sono state evidenziate un paio di criticità che non sono attualmente protette da sistemi di sicurezza:

- presenza di fughe di gas quando l’operatore con l’automezzo si reca a riempire i depositi di clienti fuori dall’impianto. In questo contesto non sono presenti sistemi che rilevano eventuali fughe dovute sia agli impianti dell’automezzo che al deposito del cliente.
- controllo degli accessi ad aree ad alto rischio dell’impianto. Queste zone sono ben delimitate e provviste di un sistema di controllo di presenza ma, quest’ultimo, viene abilitato soltanto alla chiusura dell’impianto. Durante il giorno il sistema di allarme rimane disinserito per consentire agli operatori di accedere all’area e quindi non sono in grado di monitorare eventuali intrusioni di estranei all’interno dell’area.

Partendo da queste due criticità, l’idea emersa durante la discussione è stata quella di realizzare un dispositivo di rilevamento di GPL e allerta portatile che potesse essere facilmente inserito, per esempio, alla cintura dell’operatore ed essere impiegato come sistema di identificazione. In particolare, il dispositivo può essere utile per rilevare perdite anche durante i travasi del GPL dal cliente in quanto l’operatore si trova in prossimità delle possibili zone di perdita. Il sistema può anche essere utilizzato per rilevare la presenza dell’operatore in determinate zone dell’impianto. Quest’ultima funzionalità può essere utile per disabilitare il sistema di allarme nelle zone protette. In questo modo, anche durante l’orario di lavoro, il sistema di allarme può essere lasciato attivo proteggendo così le aree da accessi di estranei. Eventuali accessi di operatori autorizzati possono essere identificati in maniera wireless grazie al sistema, evitando l’azionamento dell’allarme.

Un ipotetico schema a blocchi per la realizzazione del sistema è rappresentato in Figura 2.1-1.

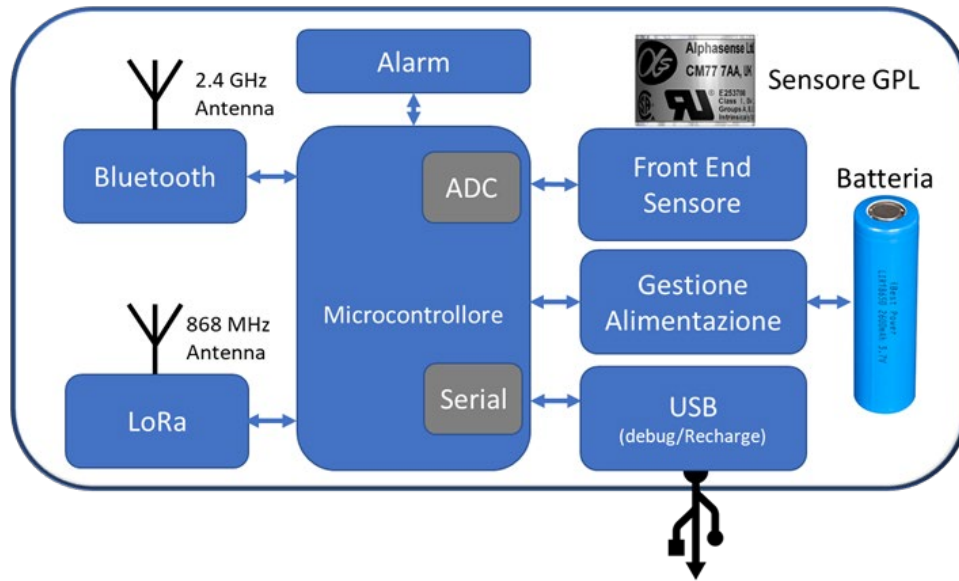


Figura 2.1-1 Schema a blocchi del dispositivo per il rilevamento GPL

Il dispositivo di rilevamento di GPL è alimentato a batteria ricaricabile in grado di assicurare un'autonomia di almeno una giornata lavorativa. Il dispositivo consente la rilevazione di GPL tramite un sensore (pellistore). Sono presenti a bordo due possibili sistemi di comunicazione a lungo raggio (LoRa) e a corto raggio (Bluetooth Low Energy, BLE).

Lo stesso dispositivo è pensato per due diverse applicazioni. La prima riguarda le operazioni all'interno del perimetro dell'impianto dove sono già presenti sensori fissi di fughe di gas. In questo contesto un dispositivo indossato dall'operatore consente la rilevazione delle fughe accidentali causate da erronee operazioni o incidenti. Inoltre, lo stesso oggetto può essere anche integrato in un sistema di controllo accessi per l'abilitazione e la disabilitazione di allarmi perimetrali o altre forme di controllo di aree protette, grazie alla connettività Bluetooth.

In Figura 2.1-2 è mostrato l'applicazione del dispositivo di rilevamento di GPL per il controllo accessi in area protetta dell'impianto mediante localizzazione tramite BLE.

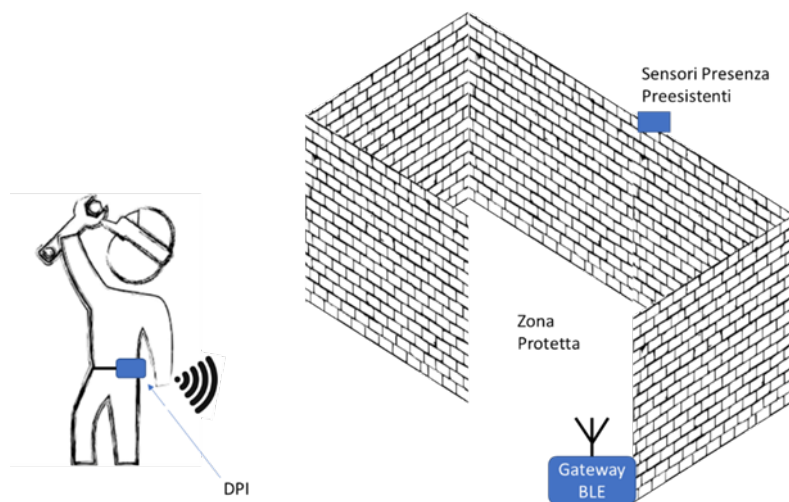


Figura 2.1-2 Limitazione accessi zona protetta all'interno dell'impianto

La seconda applicazione riguarda l'operatore che si reca in trasferta per riempire i serbatoi dei clienti o scaricare le bombole (vedi Figura 2.1-3). Il dispositivo rappresenta un sistema di allarme per la rilevazione di fughe anche in questo contesto dove non sono presenti altri sistemi di rilevazione.



Figura 2.1-3 Operazioni di caricamento e scaricamento GPL al di fuori dell'impianto

Riassumendo, la definizione dei requisiti funzionali analizzati anche con Petrolgas ha portato alla definizione degli scenari operativi illustrati e conseguentemente ai requisiti funzionali seguenti:

- Controllo degli accessi nelle aree ad alto rischio;
- Monitoraggio di gas (CO e O₂) nell'ambiente di lavoro e la generazione di allarmi nel caso di fughe di gas infiammabili fuori dall'impianto o di concentrazione dei gas monitorati fuori dai limiti.

Le informazioni raccolte sono state successivamente elaborate e tradotte in specifiche tecniche per la realizzazione del dispositivo di rilevazione.

Per la selezione dei componenti che costituiscono il dispositivo per il rilevamento GPL sono stati individuati i seguenti fattori di prestazione significativi:

- **Consumo energetico:** sistema in grado di essere alimentato a batteria per un turno di 4 ore;
- **Accuratezza di misura concentrazione gas:** alcuni ppm per CO, 1% per O₂, 0.1% per i gas infiammabili;
- **Ambiente operativo:** il dispositivo dovrà operare entro determinate condizioni di temperatura, umidità e vibrazioni;
- **Ingombro:** le dimensioni fisiche dovranno essere ridotte in modo da non intralciare le azioni dell'operatore;
- **Affidabilità:** l'affidabilità del sistema, dovrà essere studiata in modo da ridurre il più possibile la probabilità di falsi allarmi e di mancata rilevazione di situazioni di rischio.

2.2 Definizione dell'architettura della rete di telecomunicazione per la trasmissione dati nel cloud

All'interno del vasto panorama delle diverse tecnologie esistenti per la realizzazione di soluzioni IoT in ambiente misto *indoor/outdoor* con copertura a lungo raggio abbiamo selezionato le due opzioni:

- **Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)**: derivata dalla soluzione proprietaria LoRa di SemTech è uno standard di comunicazione aperto per reti a basso consumo ad alto range [Lor-022].
- **Narrow-band IoT (NB-IoT)**: Derivata dallo standard 3GPP 4G come soluzione cellulare a copertura globale per applicazioni IoT a basso consumo energetico e banda ridotta [Sch-016].

Queste soluzioni sono riassunte in Tabella 2.2-1 e Tabella 2.2-2.

Technology	LoRa WAN	NB-IoT
Bandwidth	250 kHz and 125 kHz	200 kHz
Modulation	Chirp Spread Spectrum (CSS)	QPSK
Frequency Band	Unlicensed ISM	Licensed LTE
Peak Data Rate	50 kbps	200 kbps
Range	5 km (urban), 20 km (rural)	1 km (urban), 10 km (rural)
Interference	High	Low
Handover	No	Yes
Max Payload length	243 bytes	1600 bytes

Tabella 2.2-1 Comparazione caratteristiche LoRaWAN e NB-IoT - A

Technology	LoRa WAN	NB-IoT
QoS	Less than Nb-IoT	Better QoS than LoRa
Battery Life	Sleep mode saves battery	Uses extra power for synchronization
Latency	Higher than Nb-IoT	Low
Connected Device (per cell)	100 K	50 K
Range	5 km (urban), 20 km (rural)	1 km (urban), 10 km (rural)
BS Coverage	< 20 Km	< 10 Km

Tabella 2.2-2 Comparazione caratteristiche LoRaWAN e NB-IoT - B

Le possibili implementazioni della architettura della rete, utilizzando le tecnologie precedentemente mostrate, sono invece illustrate in Figura 2.2-1 e Figura 2.2-2.

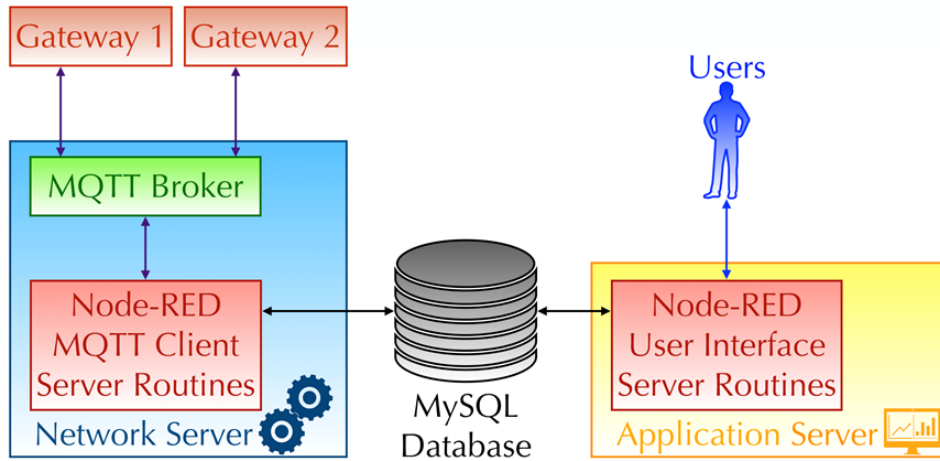


Figura 2.2-1 Architettura di rete basata su LoRaWAN

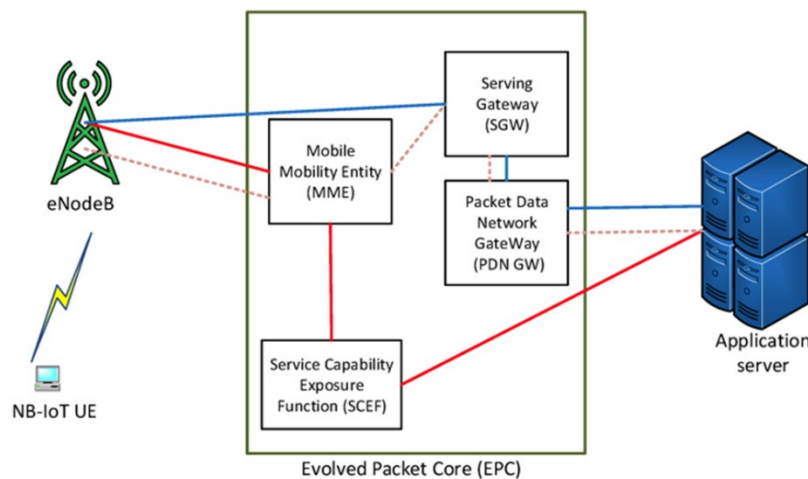


Figura 2.2-2 Architettura della rete basata su NB-IoT

A valle di questa analisi, considerando i vari vincoli e le caratteristiche delle sue architetture per la rete di comunicazione è stato considerato il migliore compromesso l'utilizzo di una rete di sensori di tipo LoRaWAN.

In particolare, i punti caratteristici che hanno portato a questa scelta sono:

- Minore costo del nodo;
- Minore consumo di energia richiesto e quindi maggiore durata della batteria vista la ridotta mole di dati da scambiare;
- Indipendenza da una rete cellulare;
- Maggiore versatilità e scalabilità per il tipo di applicazione in analisi.

3. Sviluppo di sistemi sensoriali distribuiti per la rilevazione di sostanze chimiche e relativo invio dei dati

3.1 Scelta dei sensori chimici attraverso una campagna di caratterizzazione in laboratorio

Per l'individuazione dei sensori di sostanze chimiche gassose sono state in primo luogo analizzate le situazioni di rischio nelle quali è necessario la misura di un particolare gas, come mostrato in Figura 3.1-1. Le principali situazioni di rischio prese in esame sono le seguenti:

- Presenza di gas potenzialmente esplosivi;
- Presenza di monossido di carbonio in concentrazioni tali da essere pericoloso per la salute dell'operatore (si veda la Tabella 3.1-2);
- Permanenza dell'operatore in ambienti scarsamente ventilati (p.e. depositi o cisterne) dove la concentrazione di ossigeno nell'aria può essere più bassa di quella ambientale (si veda la Tabella 3.1-1);

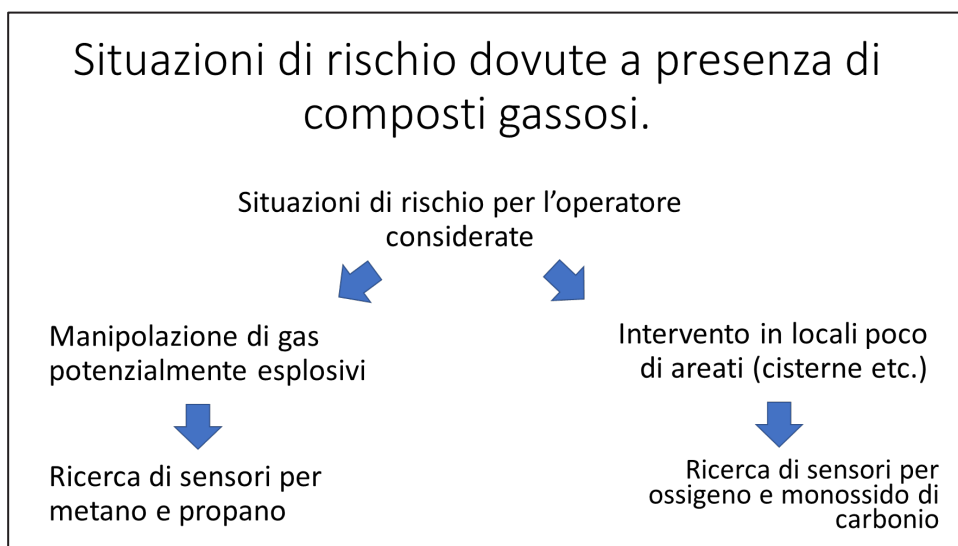


Figura 3.1-1 Analisi situazioni di rischio finalizzata alla scelta del tipo di sensore di gas

Concentrazione O ₂ volume di O ₂ /volume totale (v/v)	Effetti sulla salute
21%	Concentrazione ideale di ossigeno
19,5%	Minimo livello accettabile
16-19,5%	Possibili difficoltà respiratorie, perdita di controllo della motricità, diminuzione capacità lavorativa
12-16%	Aumento respirazione, affaticamento, perdita capacità valutative
8 - 12 %	Perdita di coscienza, nausea e vomito, cianosi
6 - 8 %	Permanenza di 4-5 minuti: possibilità di recupero 6 minuti: al 50% fatale 8 minuti: al 100% fatale
4 - 6 %	Coma in pochi secondi, morte

Tabella 3.1-1 Effetti sulla salute umana della permanenza in ambienti scarsamente ossigenati

Livello di CO (ppm)	Effetti sulla salute
0	Normale, aria fresca
9	Massimo livello indoor raccomandato
10-24	Possibile effetti sulla salute con esposizione a lungo termine
25	Massimo livello di esposizione per una giornata di 8 ore
50	Massima esposizione permessa sul posto di lavoro (OSHA)
100	Leggero mal di testa dopo 1-2 ore
200	Capogiri, nausea, stanchezza, mal di testa dopo 3-4 ore
400	Rischio per la vita nel giro di 3 ore
800	Collasso e incoscienza dopo un'ora di esposizione
1600	Morte entro 1 o 2 ore
6400	Morte entro 30 minuti
12800	Incoscienza immediata, morte entro 1-3 minuti di esposizione

Tabella 3.1-2 Effetti sulla salute umana della permanenza in ambienti scarsamente ossigenati

Data l'analisi precedentemente illustrata sono state redatte le specifiche minime richieste ai sensori commerciali:

- Per quanto riguarda il rischio di esplosione i principali gas di interesse sono composti quali **Butano (C₃H₈) o Metano (C H₄)**;
- Per quanto riguarda il rischio di soffocamento in ambienti chiusi il composto di interesse è l'**Ossigeno (O₂)** ed il **Monossido di Carbonio (CO)**;
- Il sensore deve consentire la rilevazione di fughe di gas in concentrazioni tali da garantire un preallarme ed evitare possibili deflagrazioni;
- Considerando come possibile gas il Butano C₃H₈ il livello di esplosività minimo (LEL) è del 1,8%, in caso di metano CH₄ si arriva ad un LEL di 4,4%;
- I sensori dovranno garantire la rilevazione di livelli di concentrazioni nell'ordine di grandezza del LEL considerato;
- I sensori dovranno consentire una alimentazione a batteria del dispositivo di rilevamento GPL consentendo una vita utile del dispositivo di almeno un turno lavorativo;

Le possibili tecnologie per la rilevazione di gas combustibili disponibili sul mercato e per le quale sono disponibili diversi sensori sono le seguenti:

Sensori Resistivi:

Sensori basati sulla variazione di resistività di materiali semiconduttori dovuta all'interazione (chemoassorbimento) con il gas (p.e. TGS 2620 by Figaro).

Vantaggi:

- Generalmente economici (< 25€);
- Dimensioni contenute;
- Bassi tempi di risposta.

Svantaggi:

- Risposta non lineare;

- Poco stabili nel tempo;
- Non certificati per zone a rischio esplosione;
- Elevati consumi.

Sensori catalitici (Pellistori):

Sensori basati su microsferi di materiali ceramici (pellets) rivestiti con un catalizzatore sui quali il gas può reagire. La variazione di temperatura dovuta alla reazione provoca un cambiamento di temperatura e di resistenza elettrica dell'elemento sensibile (p.e. CH-A3 Alphasense).

Vantaggi

- Risposta lineare;
- Disponibili certificati per ambienti esplosivi;
- Bassi tempi di risposta.

Svantaggi

- Mediamente più costosi dei sensori resistivi (20-50 €);
- Dimensioni maggiori;
- Consumi mediamente elevati.

Mentre per i sensori di ossigeno i requisiti stilati sono i seguenti:

- Il sensore deve consentire la rilevazione di un abbassamento della concentrazione di ossigeno prima di possibili ipossie o asfissie;
- I sensori dovranno garantire una accuratezza nell'ordine dello 0,25% al fine di rilevare livelli di ossigeno potenzialmente pericolosi;
- I sensori dovranno consentire una alimentazione a batteria del dispositivo consentendo una vita utile del dispositivo di almeno una giornata lavorativa.

Visti i precedenti requisiti e la Tabella 2.1-1 e la Tabella 2.1-2, gli unici sensori commerciali adatti all'applicazione per la rilevazione dell'ossigeno e la misura di monossido di carbonio sono i sensori elettrochimici amperometrici.

Questi sensori sono basati su reazioni di ossidoriduzione che inducono una corrente tra una coppia di elettrodi:

Vantaggi:

- Estremamente lineari e accurati;
- Mediamente economici (10-40€);
- Ampia disponibilità sul mercato;
- Basso consumo.

Svantaggi

- Durata limitata nel tempo: (1-3 anni).

Per verificare le prestazioni dei sensori selezionati e studiarne le caratteristiche, sono stati utilizzati front-end e sistemi di acquisizione prototipali ottimizzati per le diverse tipologie di sensori (resi-

stivi, elettrochimici, pellistori), è stato inoltre utilizzato un sistema di caratterizzazione, sviluppato dal partner UNISI nel Laboratorio LEEME (Laboratorio di Elettronica, elettrotecnica e Misure Elettroniche) rappresentato in Figura 3.1-2 e Figura 3.1-3.

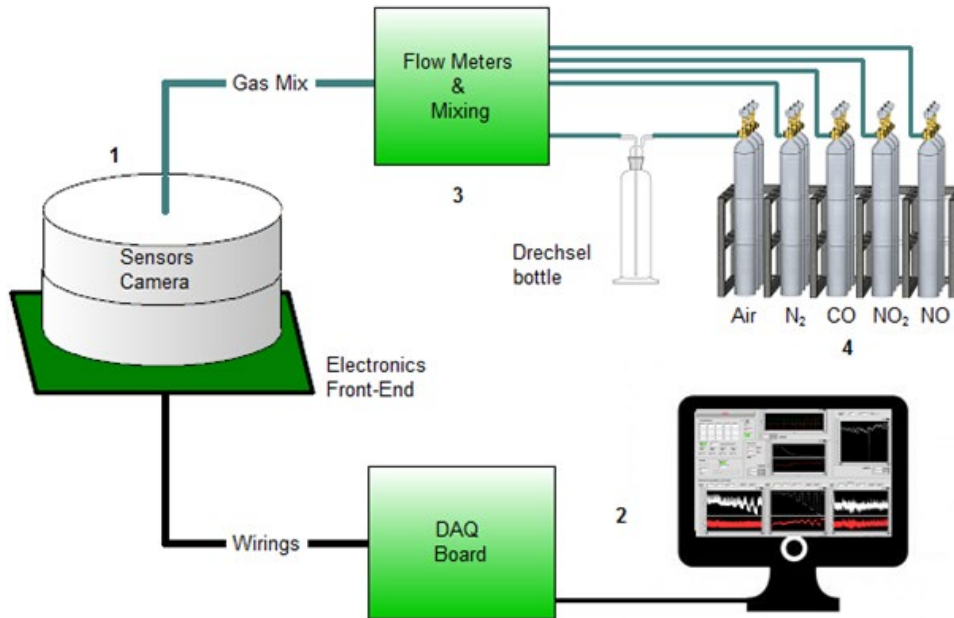


Figura 3.1-2 Schema sistema di test per sensori di gas



Figura 3.1-3 Foto del sistema di test per sensori di gas del laboratorio LEEME dell'Università di Siena

I sensori resistivi sono stati testati utilizzando un front-end in grado di riscaldare il substrato di semiconduttore e misurare la resistenza come mostrato nella Figura 3.1-4.

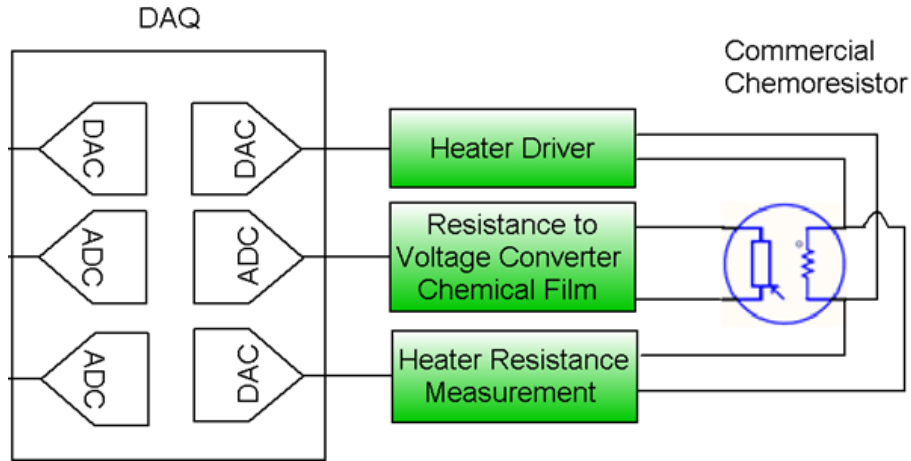


Figura 3.1-4 Front-end e sistema di acquisizione per sensori resistivi

Il test dei sensori resistivi ha mostrato le criticità previste, specialmente in termini di linearità, accuratezza, tempo di risposta e potenza assorbita. Alcuni risultati sono riportati nella Figura 3.1-5 insieme alla risposta caratteristica del sensore riportata dal produttore.

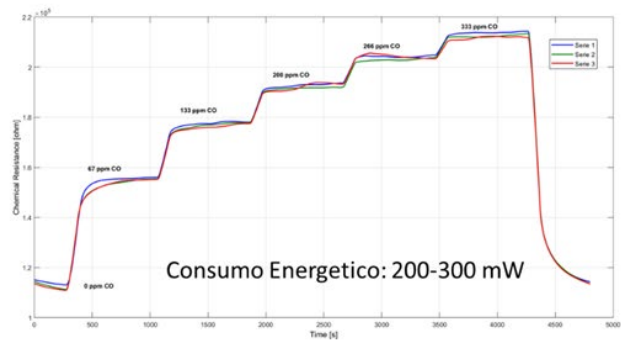
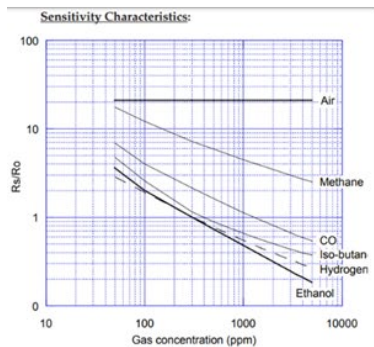


Figura 3.1-5 Sensitività dichiarata e test sensore resistivo Figaro TGS2620

I sensori elettrochimici amperometri sono stati invece testati tramite un apposito front end per la misura e l'amplificazione del segnale derivante dalla corrente generata dal sensore, funzione della concentrazione di gas. Classico circuito utilizzato è riportato nella Figura 3.1-6.

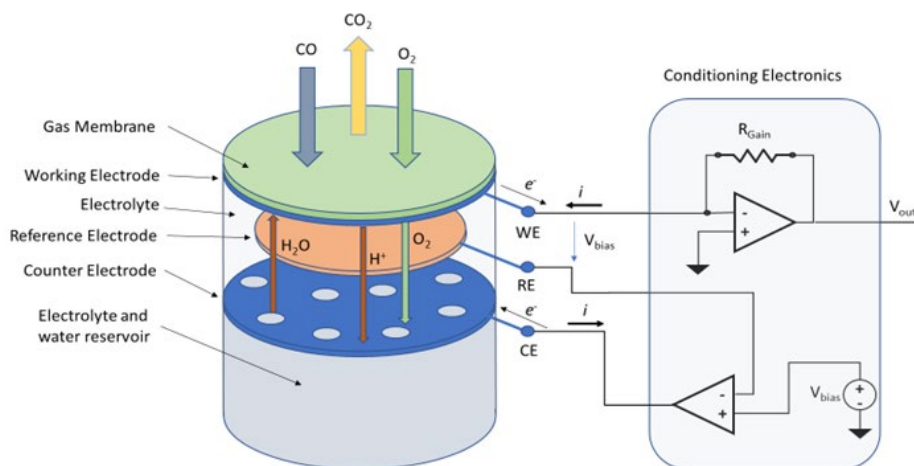


Figura 3.1-6 Front-end per sensori elettrochimici

Tale sistema di misura si basa su un circuito per il mantenimento di potenziale costante tra due elettrodi Working Electrode (WE) e Reference Electrode (RE), applicando una tensione sul contro elettrodo Counter Electrode (CE). La corrente che fluisce dal WE al CE viene convertita in tensione ed amplificata da un apposito convertitore corrente tensione. I test condotti con i sensori elettrochimici, hanno evidenziato caratteristiche promettenti per l'applicazione in esame, in termini di potenza assorbita, tempo di risposta e accuratezza, come evidenziato dai risultati riportati nella Figura 3.1-7.

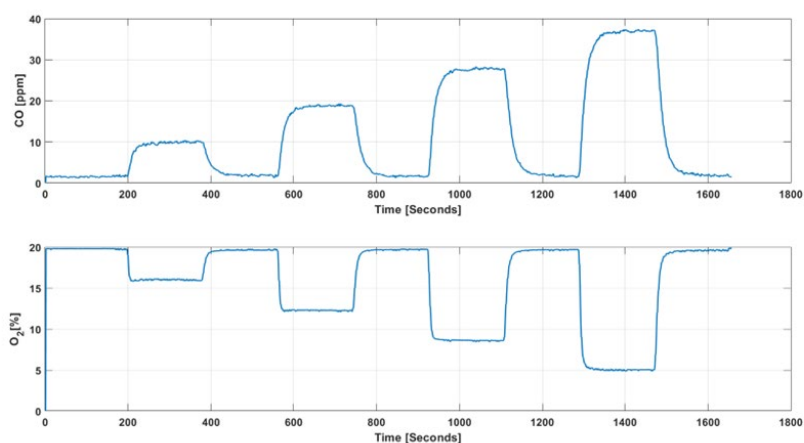


Figura 3.1-7 Test sensori elettrochimici di CO (CO-A4 Alphasense) e di O₂ (O₂-A1 Alphasense)

Per quanto riguarda la misura di gas infiammabili, i sensori catalitici sono stati testati utilizzando un apposito front-end mostrato nella seguente Figura 3.1-8.

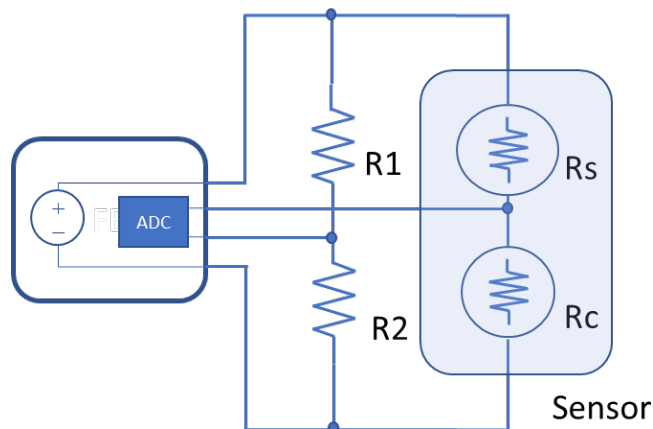


Figura 3.1-8 Front-end per sensori catalitici

Il sensore catalitico consiste in una coppia di resistenze che, se attraversate da una corrente, si riscaldano. Una delle due resistenze (Rc) è isolata dal gas mentre l'altra (Rs) è esposta al gas che reagendo con l'ossigeno innesca una reazione di combustione. Tale reazione eleva la temperatura della resistenza che cambia quindi il suo valore elettrico consentendo la misura tramite una classica configurazione a ponte con due resistori esterni.

Il comportamento di un pellistore in presenza di gas metano con concentrazioni sotto il LEL è stato testato ed i risultati sono stati riportati in Figura 3.1-9, Figura 3.1-10, Figura 3.1-11.

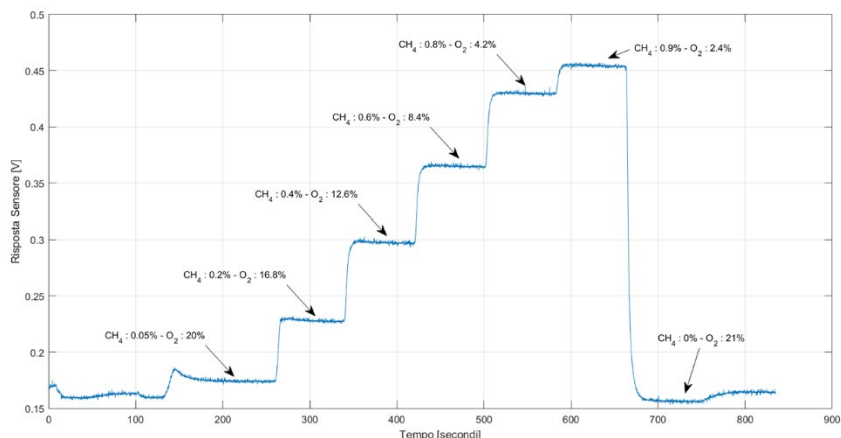


Figura 3.1-9 Test Sensore catalitico in aria secca in presenza di metano

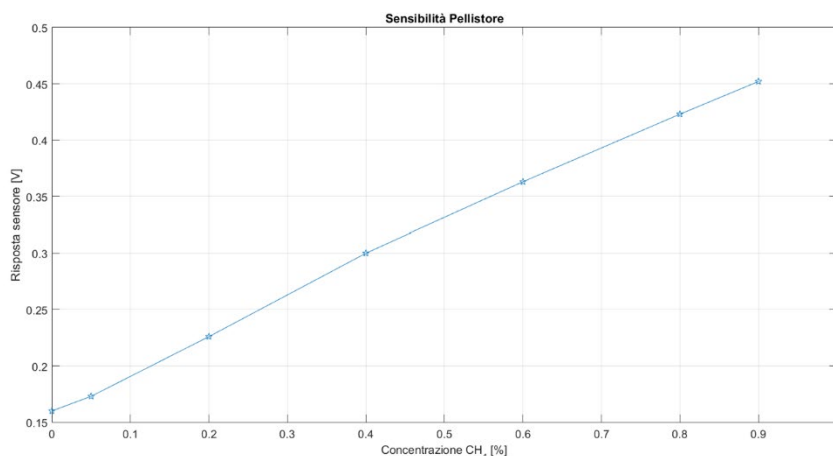


Figura 3.1-10 Verifica linearità sensore catalitico

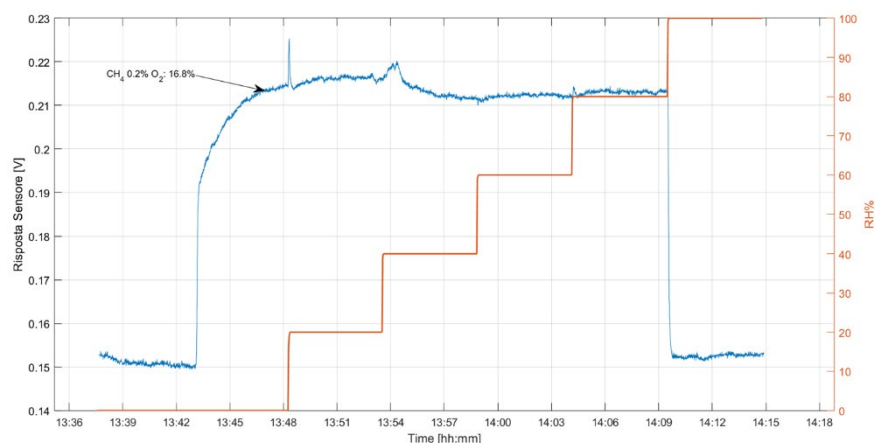


Figura 3.1-11 Test sensore catalitico con diverse umidità relative

Sulla base dei risultati ottenuti in questa fase di studio e caratterizzazione sono stati scelti i sensori da utilizzare nel dispositivo di rilevamento oggetto di questo progetto. Le scelte fatte sono riassunte nella Figura 3.1-12.

Scelta dei sensori

- Rivelazione di gas esplosivi:
 - ✘ Sensore Resistivi : Poco accurati e inadatti all'ambiente operativo.
 - Sensori Catalitici: Idonei alla applicazione (p.e. *CH-A3 Alphasense*).
- Rivelazione di ossigeno e monossido di carbonio:
 - Sensori Elettrochimici: Dai test sono risultati idonei alla applicazione (p.e. *O2-A1* e *CO-A4 Alphasense*).

	Ossigeno	Monossido di Carbonio	Esplosivi
Tecnologia	Elettrochimici	Elettrochimici	Catalitici
Sensibilità	10 μ A / %O ₂	300 nA / ppm	20mV / %metano
Modello	O2-A1/2/3	CO-A4	CH-A3
Consumo	180 μ W	180 μ W	190 mW

Figura 3.1-12 Scelta sensori di gas commerciali idonei all'applicazione

3.2 Sviluppo del sistema sensoriale per i composti chimici target.

A seguito della valutazione preliminare inerente la tipologia di sensori di gas da installare e alle considerazioni sull'architettura del sistema riportate in precedenza, si è quindi proceduto alla progettazione del sistema sensoriale (nodo sensore) in tutte le sue parti. In particolare, tutti i sottosistemi riportati nell'architettura di massima sono stati progettati nel dettaglio consentendo la realizzazione dell'elettronica del dimostratore. Tale attività ha riguardato sia la progettazione hardware, quindi tutta la parte elettronica del sistema sia lo sviluppo del firmware del microcontrollore che gestisce il sistema nodo sensore. In particolare, il firmware gestisce la lettura dei parametri ambientali dai sensori, la trasmissione dei dati tramite protocollo wireless LoRaWAN e consente un interfacciamento per la calibrazione dei sensori nonché la diagnostica avanzata tramite una interfaccia seriale.

Nella Figura 3.2-1 è riportata l'architettura dettagliata del dimostratore realizzato.

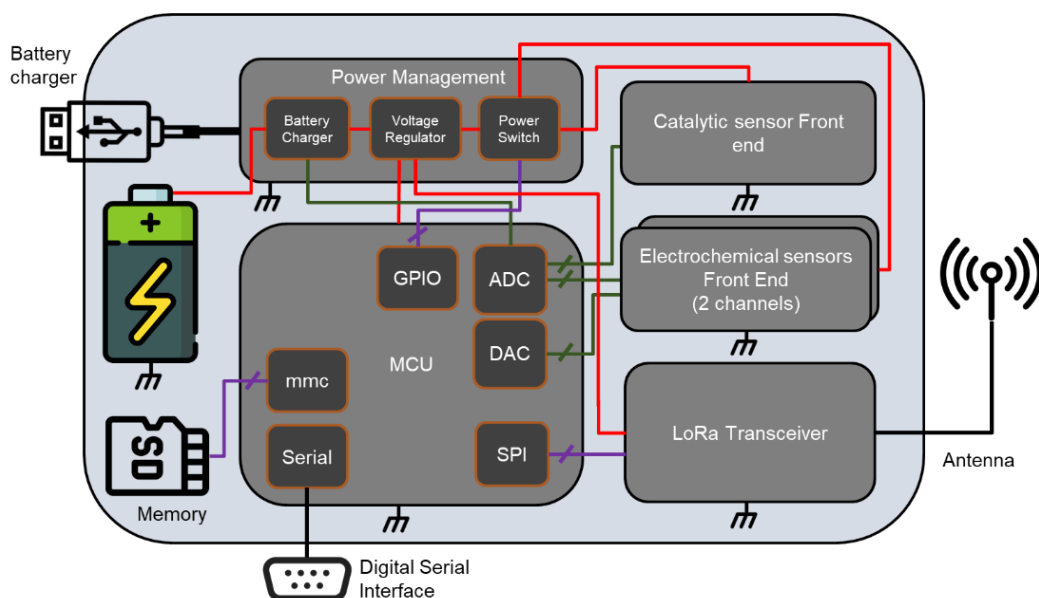


Figura 3.2-1 Architettura del nodo sensore

Osservando la figura è possibile evidenziare le varie parti progettate. Il nodo sensore consente l'interfacciamento di due sensori elettrochimici amperometrici per la misura di ossigeno (O₂) e monossido di carbonio (CO). I sensori utilizzati sono il CO-A4 per il CO e l'O₂-A1 per l'O₂, entrambi prodotti da *Alphasense*. Per la misura di miscele esplosive è stato utilizzato un sensore catalitico sensibile a propano butano e metano (CH-A3) sempre prodotto da *Alphasense*. La parte elettronica di condizionamento dei sensori consente di polarizzare correttamente i sensori, di amplificare i segnali di uscita (una corrente per i sensori elettrochimici ed una variazione di resistenza per il sensore catalitico) e convertirli in tensione per poi poter essere acquisiti dal convertitore analogico digitale del microcontrollore.

Il sensore di CO viene utilizzato per generare un allarme in caso di superamento di una soglia settabile in fase di configurazione così come il sensore di O₂ grazie al quale viene invece generato

un allarme in caso di livelli rilevati di ossigeno inferiori ad un'altra soglia impostabile. In merito al sensore di miscele aria gas potenzialmente esplosive, considerando che i tre target gas hanno dei livelli minimi di esplosività (LEL) diversi ed il sensore li rileva con diverse sensibilità è stata adottata la seguente strategia per la generazione di un allarme.

Essendo il sensore sensibile, e con sensibilità diverse, a tutti e tre i composti, è stata calcolata una soglia di sicurezza corrispondente al livello più basso dei tre LEL. Il LEL del metano (5% in vol) corrisponde ad una uscita del sensore di 2,5 V mentre il LEL del butano (1,8% in volume) corrisponde ad una uscita del sensore di 0,6 V, infine il LEL del propano (2,1% in volume) corrisponde ad una uscita del sensore di 0,7 V. Tramite queste considerazioni è possibile impostare la soglia di allarme per questo sensore a 0,5 V avendo un buon margine di sicurezza per tutti questi gas.

Nella Figura 3.2-2 è riportato il circuito di condizionamento utilizzato per i sensori elettrochimici, così come anticipato nella precedente relazione si tratta di un classico circuito potenziostatico realizzato con componenti ottimizzati per ridurre al minimo il consumo energetico.

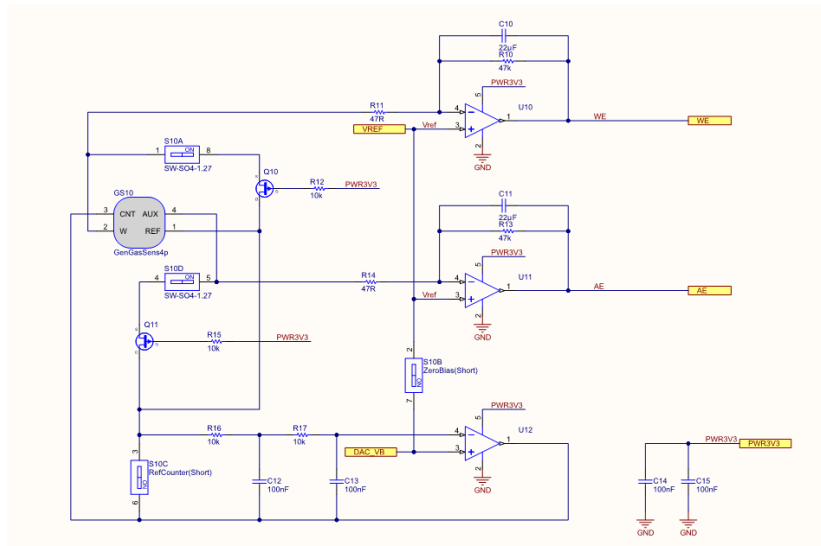


Figura 3.2-2 Schema elettrico front end sensori elettrochimici

Nella Figura 3.2-3 è riportato invece il circuito di condizionamento utilizzato per i sensori di tipo catalitico, comunemente chiamati “Pellistori”. Anche in questo caso una maggiore descrizione del loro funzionamento e del sistema di lettura è riportata nella precedente relazione.

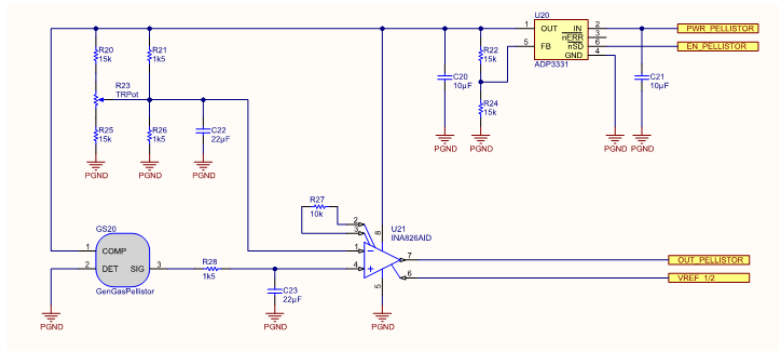


Figura 3.2-3 Schema elettrico front end sensori catalitici

La configurazione del sistema è possibile attraverso un'interfaccia seriale ed una Command Line Interface (CLI) che consente il caricamento di tutti i parametri di configurazione dei sensori e della trasmissione radio tramite protocollo LoRaWAN.

In Figura 3.2-4 e Figura 3.2-5 sono riportate delle foto del sistema realizzato. Esso si compone di due schede elettroniche, una (la sottostante detta Main Board) contenente il microcontrollore una SD card per il salvataggio locale dei dati, il ricetrasmittitore LoRa ed il sistema di gestione (compresa la ricarica della batteria) della potenza. La scheda superiore (Sensors Hat) contiene invece l'elettronica di interfacciamento per i sensori ed i connettori per questi ultimi.

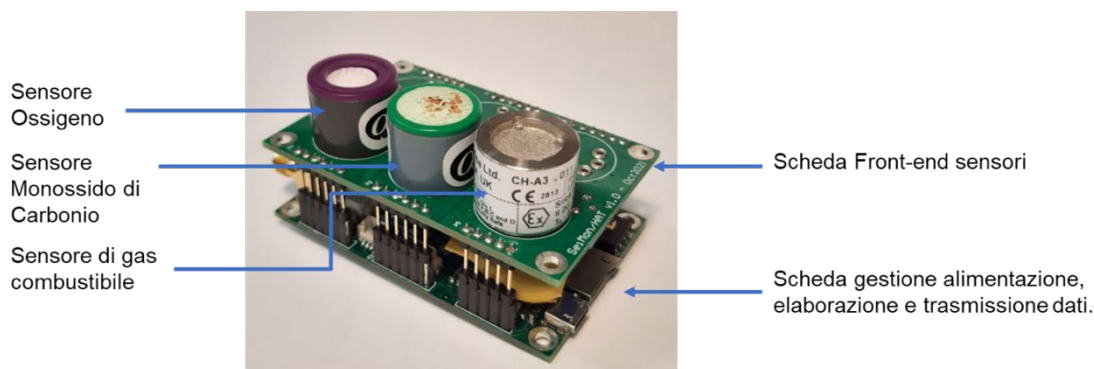


Figura 3.2-4 Foto della parte elettronica del nodo sensore

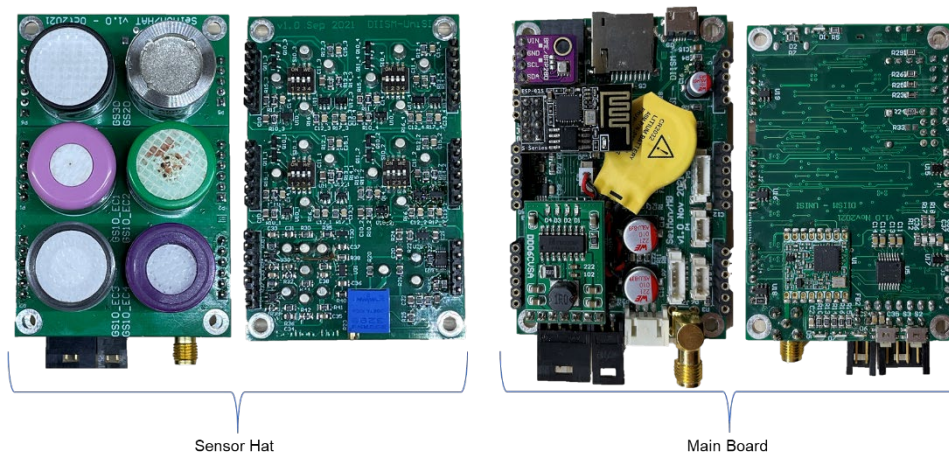


Figura 3.2-5 Foto delle schede componenti la parte elettronica del nodo sensore

Tale separazione, oltre a rendere il sistema modulare ed espandibile, ha anche lo scopo di isolare il più possibile la parte di sensore, molto sensibile a rumori e disturbi, dal resto dell'elettronica per ottenere misure più accurate. Come si può notare dalle foto, il Sensor hat può alloggiare altri due sensori elettrochimici ed un sensore di tipo infrarosso per esempio utilizzato per la misura di anidride carbonica (sensori opzionali). Tale scelta è stata presa per eventuali futuri sviluppi del sistema che necessitino l'introduzione di altre grandezze da misurare.

In Figura 3.2-6 è illustrato il nodo sensore in un involucro plastico in ABS realizzato tramite stampa 3D indossato da una persona. Per finalità diagnostiche è stato anche aggiunto un piccolo display OLED per la visualizzazione dei principali parametri.



Figura 3.2-6 Nodo sensore realizzato

3.3 Test e verifica delle funzionalità del sistema sviluppato

Il sistema sviluppato è stato testato con i target gas per la verifica della corretta rilevazione delle soglie di allarme e contestualmente il suo consumo energetico è stato monitorato. Per quanto riguarda l'acquisizione dei sensori elettrochimici e del sensore catalitico le performance riportate in precedenza sono state confermate dai test effettuati con il nodo sensore sviluppato. Si riportano di seguito in Figura 3.3-1 i risultati dei test effettuati.

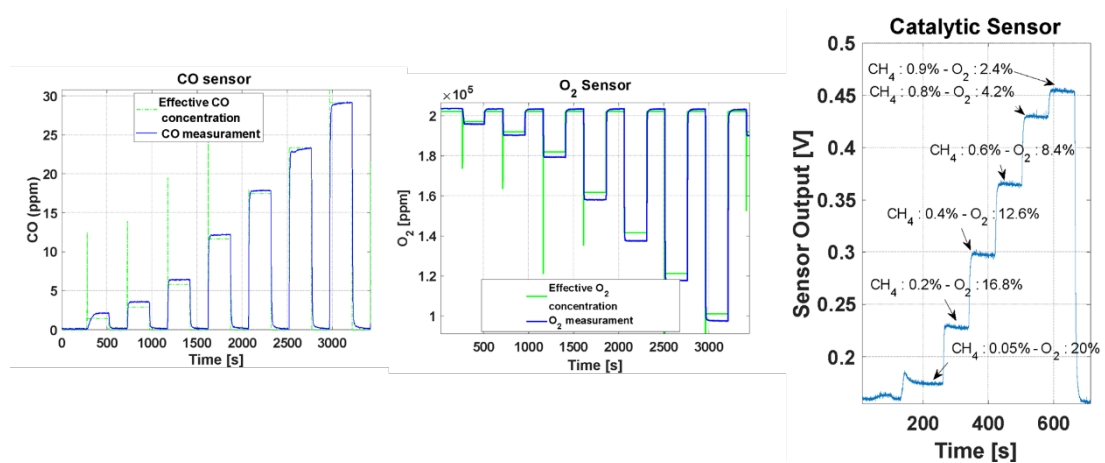


Figura 3.3-1 Test tramite miscele di gas a concentrazione nota dei sensori montati sull'elettronica sviluppata

È stato quindi valutato il consumo energetico del sistema per la stima della durata della batteria. La batteria che alimenta il nodo sensore è una batteria al litio di tipo 18650, nelle tabelle riportate di seguito sono state mostrate alcune stime sulla durata della batteria in base a diversi utilizzi del sistema (50% di *duty cycle* per il sensore catalitico in Tabella 3.3-1 e monitoraggio continuo in Tabella 3.3-2) in termini di periodo di accensione dei sensori ed in particolare del sensore maggiormente energivoro, ovvero il sensore catalitico di gas esplosivi. L'analisi tiene conto dei principali sotto-componenti del sistema e della loro richiesta energetica rispetto al consumo totale del nodo sensore. Per quanto riguarda la trasmissione dati, durante il test effettuato, il nodo sensore invia informazioni sul canale radio ogni 120s (pacchetti standard). Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, il sistema è programmato per inviare un messaggio immediato (pacchetto urgente) in caso di superamento di una o più soglie critiche di concentrazione.

Sensors and conditioning electronics power consumption for 1 measurement cycle (s)			120			
Phase	Device	Consumption (mW)	Total (mW)	Period (s)	Energy (mWh)	% on Total
Measurement Toxic only	Main Board	15	15.7	2	0.0087	0.24
	Catalytic Sensor	0				
	Electrochemical Sensors	0.66				
	Radio Module	0				
Measurement Toxic and Explosive (min 60s)	Main Board	15	215.7	60	3.5943	98.76
	Catalytic Sensor	200				
	Electrochemical Sensors	0.66				
	Radio Module	0				
Trasmission	Main Board	15	345.7	0.1	0.0096	0.26
	Catalytic Sensor	0				
	Electrochemical Sensors	0.66				
	Radio Module (LoRa)	330				
Standby	Main Board	1	1.7	57.9	0.0267	0.73
	Catalytic Sensor	0				
	Electrochemical Sensors	0.66				
	Radio Module (LoRa)	0				
Average cycle power consumption			109.2	mW		
Energy per Cycle			3.6	mWh		
Battery capacity			7.4	Wh		
Battery Lifetime			67.8	h		

Tabella 3.3-1 Stima della vita utile della batteria con *duty cycle* del 50% del sensore catalitico

Sensors and Conditioning electronics power consumption for continuous operation			
Phase	Device	Consumption (mW)	Total (mW)
Measurement and transmission	Main Board	15	216
	Catalytic Sensor	200	
	Electrochemical Sensors	0.66	
	Radio Module (1 TX every 120s)	0.3	
Average cycle power consumption			216.0 mW
Battery capacity			7.4 Wh
Battery Lifetime			34.3 h

Tabella 3.3-2 Stima della vita utile della batteria con funzionamento continuo del sistema

Come si evince dall'ultima tabella, per un monitoraggio continuo in zone ad alto rischio, ovvero mantenendo tutti i sensori attivi continuamente, la durata della batteria è di circa 34 ore.

3.4 Studio affidabilistico dell'elettronica sviluppata e integrazione dei sistemi sensoristici con i sistemi di comunicazione

Lo studio affidabilistico condotto sul nodo sensore ha come obiettivo quello di stimare la vita utile del sistema in base a diversi scenari operativi e diverse temperature di funzionamento. L'analisi è stata condotta sia considerando separatamente le due schede elettroniche che lo compongono (Sensor Hat e Main Board) che considerando la composizione di entrambe. Per fare ciò sono stati considerati i tassi di guasto (failure rates) di tutta la componentistica elettronica dei sottosistemi utilizzando database militare Mil-HDBK-217F2 (Modello Black Box). Sono stati considerati tre tipi di ambiente operativo descritti in Tabella 3.4-1.

Ambiente	Descrizione	Temperatura presunta, parti attive (T _J , °C)	Temperatura presunta ambiente (T _{Ambient} , °C)
Ground Benign (GB)	Ambienti non mobili, a temperatura e umidità controllate facilmente accessibili alla manutenzione; include strumenti di laboratorio e apparecchiature di prova, apparecchiature elettroniche mediche, complessi informatici aziendali e scientifici e missili e apparecchiature di supporto in silos a terra.	50	30
Ground Fixed (GF)	Ambienti moderatamente controllati come installazione in rack permanenti con aria di raffreddamento adeguata e possibile installazione in edifici non riscaldati; include l'installazione permanente di radar per il controllo del traffico aereo e strutture di comunicazione.	60	40
Ground Mobile (GM)	Attrezzature installate su veicoli gommati o cingolati e attrezzature trasportate manualmente; include apparecchiature di supporto a terra per missili tattici, apparecchiature di comunicazione mobile, sistemi di direzione tattica del fuoco, apparecchiature di comunicazione portatili, designazioni laser e telemetri.	65	45

Tabella 3.4-1 Ambienti operativi considerati nell'analisi

Partendo dalla lista dei componenti e dal database, utilizzando per i calcoli la condizione peggiorativa che considera tutti i componenti in configurazione serie (come da RBD classico), è stata quindi condotta l'analisi i cui risultati sono espressi in FPMH ovvero il numero di *failure* per milioni di ore.

La Figura 3.4-1 mostra i risultati ottenuti nei tre ambienti operativi considerati delle due schede componenti il nodo sensore e del sistema completo.

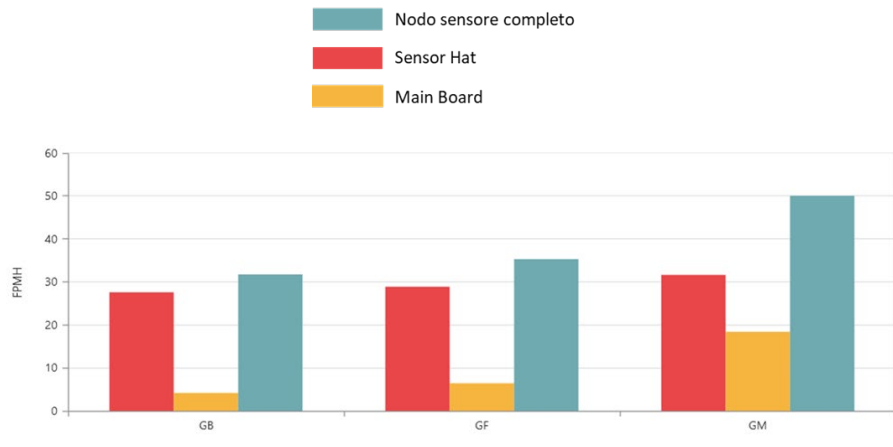


Figura 3.4-1 Analisi della FPMH sei vari sottocomponenti del sistema in base agli ambienti operativi

Si è condotta anche un'analisi al variare del campo operativo di temperature da -10 a $+80^{\circ}\text{C}$ considerando l'ambiente Ground Mobile come mostrato in Figura 3.4-2. Da tale analisi non si evince una particolare criticità con la temperatura di funzionamento del dispositivo che sarà ovviamente in minor range rispetto a -10°C - 80°C .

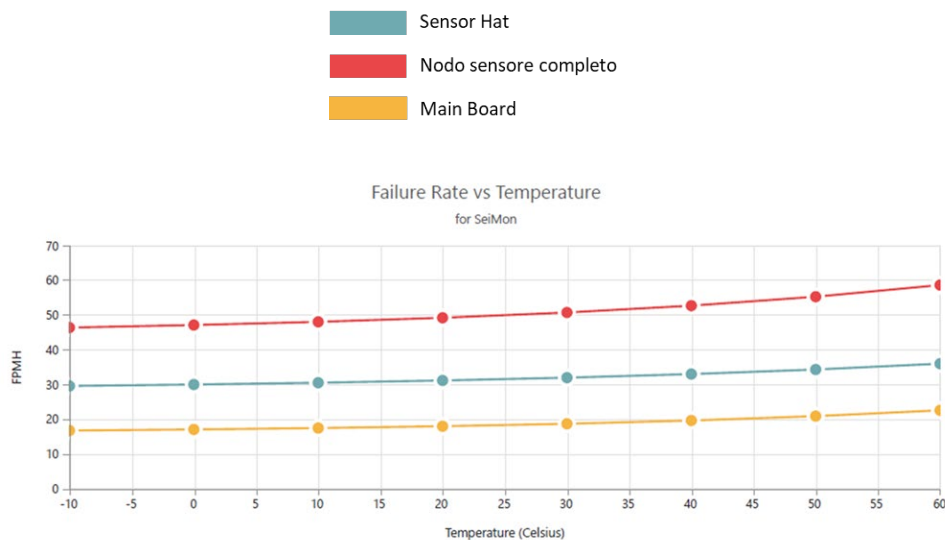


Figura 3.4-2 Analisi della FPMH sei vari sottocomponenti con ambiente Ground mobile al variare della temperatura di lavoro

Considerando le presunte condizioni operative è stato infine eseguito uno studio tenendo conto di un uso effettivo (*duty cycle*) del sistema pari all'80% del tempo nominale di utilizzo all'interno di una giornata con condizioni operative pari a 25°C e con un ambiente Ground Mobile.

In Tabella 3.4-2 Tabella riassuntiva dei risultati della analisi affidabilistica si riportano gli esiti di questa analisi espressi in funzione del Mean Time Between Failures (MTBF), failure rate ovvero il numero di guasti per unità di tempo, la percentuale di incidenza sul complessivo failure rate di ciascuna scheda del sistema (per le due schede) ed il valor medio del failure rate considerando che il sistema non opera con un *duty cycle* del 100% ma dell'80%.

Componente	Failure Rate	MTBF	Percentuale sul failure rate del Nodo Sensore Completo
Nodo Sensore Completo	19,56 10 36	5 1122,04	-
Sensor Hat	4,35 98 19	229 367,30	22,29
Main Board	15,20 12 17	6 5784,21	77,71

Tabella 3.4-2 Tabella riassuntiva dei risultati della analisi affidabilistica

I risultati ottenuti mostrano che per un utilizzo presunto dell'80% delle ore ogni giorno, il sistema sviluppato è caratterizzato da un valore di MTBF di circa 50000 ore.

4. Sviluppo di sistemi sensoriali distribuiti per la localizzazione di persone e mezzi e relativo invio dei dati

4.1 Sviluppo di sistemi di localizzazione ibridi

L'obiettivo di un sistema di localizzazione è, in generale, quello di stimare la posizione (in termini di coordinate) di un target che si muove all'interno di un sistema di riferimento. Nell'ambito del progetto CP-SEC, il problema della localizzazione è stato suddiviso nelle seguenti due casistiche principali, per le quali sono state analizzate singolarmente le tecnologie più adatte:

- Sistema di localizzazione *indoor*: inteso come un sistema per la stima della posizione di un target che si muove in uno spazio chiuso (come ad esempio un magazzino, un impianto o un'area produttiva). Per questo scenario, si è scelto di utilizzare un approccio ibrido che integra due tecnologie: radio (*Ultra-WideBand*, UWB) e inerziale (basata sull'uso di *Inertial Measurement Unit*, IMU).
- Sistema di localizzazione *outdoor*: inteso come un sistema di localizzazione di un target all'interno di uno spazio aperto (come ad esempio cantieri, piazzali, aree di stoccaggio all'aperto, ecc...). In questo ambito, si è scelto di utilizzare una soluzione basata su sistemi satellitari di tipo *Real Time Kinematic* (RTK).

Queste due tipologie di sistemi si differenziano in modo significativo, sia per quanto riguarda i vincoli di funzionamento, sia per le tecnologie utilizzabili. Per questo motivo i due scenari sono

stati inizialmente analizzati in modo separato, sviluppando algoritmi ibridi dedicati e sostanzialmente differenti.

Il primo obiettivo dell'attività del progetto è stato quindi lo sviluppo di due prototipi di nodi IoT (uno per ciascun scenario) che integrino sistemi *Commercial Off-The-Shelf* (COTS) e che implementano gli algoritmi necessari alla localizzazione, inviandoli poi ad un sistema di monitoraggio remoto, tramite tecnologia wireless. Gli aspetti sfidanti del problema sono stati i seguenti:

- integrazione tra tecnologie differenti per migliorare le prestazioni degli algoritmi di localizzazione basati su una singola tecnologia;
- compromesso tra costo computazionale e costo trasmissivo;
- integrazione dei dati di localizzazione in un sistema di monitoraggio in tempo quasi-reale in scenari di sicurezza sul lavoro;
- valutazione del grado di precisione della localizzazione in ambienti con ostacoli (valutazione dell'impatto sulle comunicazioni radio).

I target di riferimento selezionati all'interno del progetto sono di due tipologie: personale, che quindi utilizzerà un sistema il più possibile indossabile ("*wearable*"), e mezzi in movimento nell'area da monitorare, quali ad esempio autoveicoli, carrelli semoventi o muletto.

Nel seguito verranno presentati gli sviluppi degli algoritmi nei due scenari identificati, e saranno descritti i componenti dei prototipi sviluppati nel corso del progetto. I due prototipi sono stati sviluppati dapprima come separati per i due scenari, e successivamente unificati in un unico prototipo [Dav-022]. Verranno quindi presentati alcuni risultati sperimentali ottenuti.

4.2 Sistema di localizzazione per lo scenario *indoor*

Il sistema di localizzazione sviluppato per lo scenario *indoor* è un sistema ibrido che prevede l'integrazione di due differenti tecnologie: sensori UWB e sistemi inerziali (tramite l'utilizzo di IMU). Più nel dettaglio, il sistema prevede che:

- il target (che può essere una persona o un mezzo) sia equipaggiato con un nodo IoT dotato di IMU e di un tag UWB;

nell'ambiente da monitorare sia installato un certo numero $N \geq 2$ di ancore UWB.

L'algoritmo di localizzazione ha quindi il compito di stimare la posizione del nodo target, utilizzando ed integrando sia i dati di orientazione provenienti dalla IMU, sia le informazioni provenienti dalle N ancore UWB, che comunicano con il target formando quindi una rete. Uno degli obiettivi principali di questa attività è stato quello di ottenere buone prestazioni (in termini di accuratezza di localizzazione) con un numero minimo di ancore UWB, per limitare al massimo il costo dell'infrastruttura, sfruttando l'informazione inerziale aggiuntiva.

È stata valutata anche la possibilità di integrare sensori ultrasonici (come previsto in fase di proposta progettuale), ma l'utilizzo di tag UWB ha di fatto reso superfluo (nel senso di accuratezza di localizzazione) l'utilizzo di sensori ultrasonici ai fini della localizzazione. I sensori ultrasonici potrebbero essere considerati come una sorta di sistema di "*back-up*" per riconoscimento di ostacoli imprevisti nel caso di assenza di copertura degli altri sistemi di localizzazione.

Durante lo svolgimento del progetto quindi, la prima parte delle attività è stata riservata alla ricerca dei sensori più adatti allo scopo, e alla valutazione dei vincoli specifici degli scenari identificati.

Per quel che riguarda i tag UWB, si è scelto di utilizzare il dispositivo Decawave DWM1001 mostrato in Figura 4.2-1 [Dec-022], mentre per quel che riguarda la scelta della IMU, dopo diverse prove sperimentali, si è scelto di utilizzare il sensore Bosch BNO055, mostrato in Figura 4.2-2 [Bos-022], in quanto fornisce informazioni complesse quali quaternioni, angoli di Eulero, vettore di rotazione, accelerazione lineare e forza di gravità. Il sensore Bosch dispone di 9 gradi di libertà, è quindi composto da accelerometro, giroscopio e magnetometro, e permette di ottenere le informazioni provenienti dalla fusione dei tre sensori.



Figura 4.2-1 Dispositivo IoT Decawave DWM1001

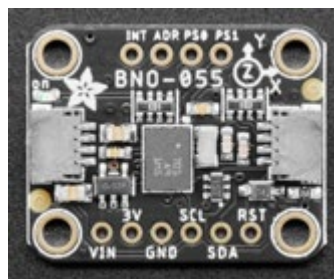


Figura 4.2-2 Sensore inerziale Bosch BNO055

Ogni ancora UWB è dotata di una batteria ricaricabile RCR123a da 3.7V che consente di alimentare il modulo in assenza di corrente elettrica per circa 24 ore. È comunque possibile alimentarle anche in modo permanente e cablato, tramite la porta di tipo micro-USB.

A livello operativo, le ancore UWB devono essere configurate per appartenere ad una medesima rete attraverso l'impostazione di un identificativo (denominato PANID) e delle proprie coordinate spaziali all'interno dell'ambiente di riferimento. Tali coordinate possono essere calcolate in autonomia sfruttando i segnali radio, oppure impostate manualmente tramite un applicativo esterno, sulla base di misure effettuate all'interno dell'ambiente stesso. La comunicazione con le ancore av-

viene tramite Bluetooth, attraverso l'utilizzo di una App mobile Android fornita da Decawave. Per ottenere risultati più precisi, è consigliabile calcolare la posizione di ogni ancora, e posizionare le stesse all'altezza massima possibile all'interno dell'ambiente da monitorare. Una volta completata questa procedura di setup iniziale, ogni ancora UWB possiede quindi le proprie coordinate (come vettore x, y, z) nello spazio reale, ed ogni informazione proveniente dal sistema UWB sarà riferita a tale sistema.

Il setup hardware selezionato per il prototipo in ambiente *indoor* prevede quindi l'installazione esterna di ancore UWB Decawave DWM1001, mentre l'hardware del prototipo per il nodo target, è composto dai seguenti componenti COTS:

- 1 Raspberry Pi 3 B+ (RPi3), con funzionalità di *processing unit*;
- 1 modulo IMU, in dettaglio Bosch BNO055, inclusivo di accelerometro, giroscopio e magnetometro);
- 1 modulo UWB di tipo Decawave DWM1001;
- 1 modulo di alimentazione tramite *battery pack* USB connesso al modulo RPi3.

L'algoritmo di localizzazione *indoor*, che risiede sulla memoria del modulo RPi3, è stato sviluppato utilizzando il linguaggio Python.

Il modulo DWM1001 comunica con la RPi3 tramite protocollo SPI [Lee-009], ed il collegamento avviene mediante un *header* 13x2 (saldato sul DWM1001) come mostrato in Figura 4.2-3.



Figura 4.2-3 RPi3 connessa alla IMU ed al tag UWB DWM1001

La RPi3 comunica con la IMU tramite il protocollo I2C attraverso alcuni GPIO, ottenendo le informazioni di orientazione e accelerazione che vengono utilizzate con le informazioni del sensore

UWB per migliorare la posizione stimata del tag UWB all'interno dell'ambiente di riferimento. Un file di configurazione permette di configurare il sistema di coordinate delle ancore con il sistema di orientazione terrestre ottenuto dall'IMU, consentendo di "fondere" le informazioni dell'IMU con quelle dell'UWB.

Per migliorare le informazioni provenienti dalla IMU è stata effettuata una procedura di calibrazione dell'accelerometro e magnetometro a bordo della RPi3, mediante la libreria "RTIMULib2 v.2" poiché, rispetto ad altre librerie testate, fornisce una calibrazione migliore e una maggiore stabilità dei dati.

Per verificare il funzionamento dell'algoritmo di localizzazione sviluppato sono state effettuate diverse prove sperimentali all'interno della sede Scientifica del Dipartimento di Ingegneria e Architettura (DIA) dell'Università di Parma. Più nel dettaglio, i test si sono svolti lungo il corridoio principale del DIA, in cui sono state installate un numero variabile di ancore UWB, tutte posizionate ad una altezza di circa 2 m. Il nodo target è stato invece posizionato su un carrello, come mostrato in Figura 4.2-4.

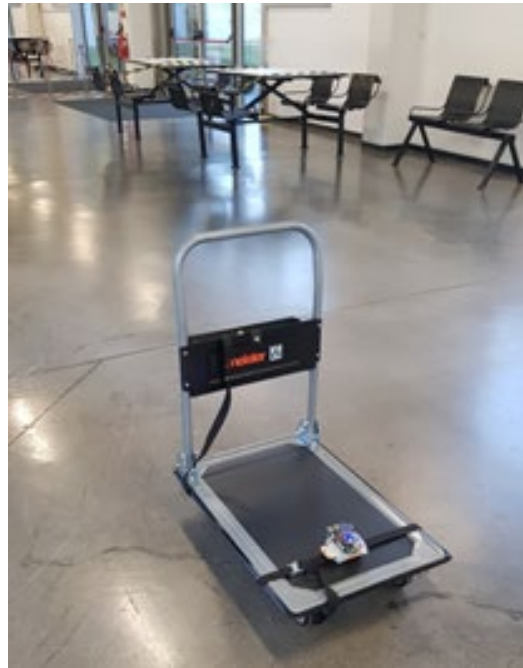


Figura 4.2-4 Posizionamento del nodo target (scenario *indoor*)

Nelle figure seguenti sono stati riportati i risultati sperimentali ottenuti con l'installazione ambientale di 2 ancore UWB (la cui posizione nelle immagini seguenti è segnalata con un triangolo rosso) e quattro tipologie di movimento del carrello, indicate dalla Figura 4.2-5 alla Figura 4.2-8. Per ogni test vengono riportati due grafici: il grafico sulla sinistra mostra il percorso reale del target indicato con una freccia, mentre il grafico sulla destra mostra il percorso ricostruito dall'algoritmo di localizzazione. In ogni grafico, l'unità di misura degli assi è il metro.

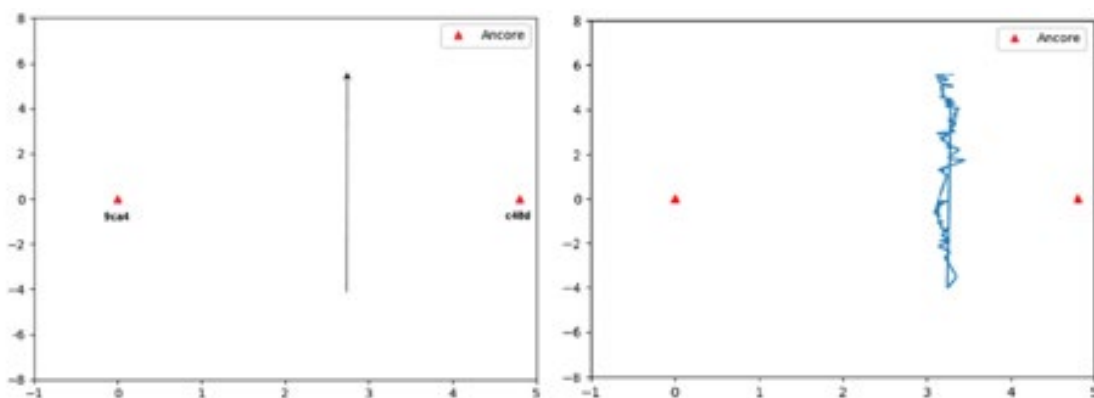


Figura 4.2-5 Risultati sperimentali dell’algoritmo di localizzazione *indoor* con 2 ancore UWB con movimento rettilineo del target

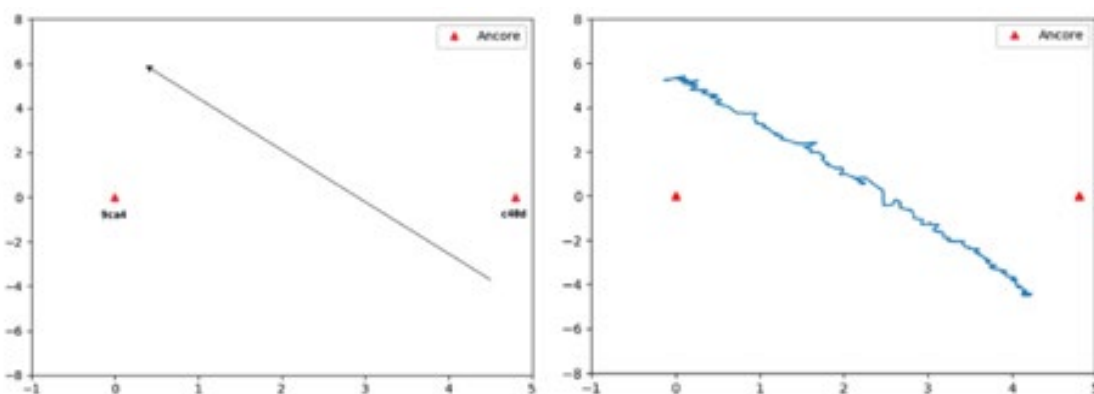


Figura 4.2-6 Risultati sperimentali dell’algoritmo di localizzazione *indoor* con 2 ancore UWB con movimento del target in diagonale

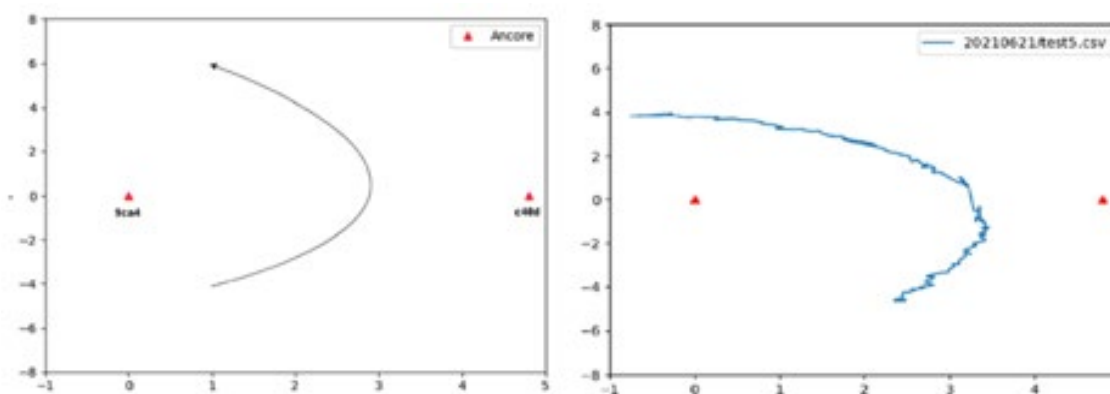


Figura 4.2-7 Risultati sperimentali dell’algoritmo di localizzazione *indoor* con 2 ancore UWB con movimento curvilineo del target

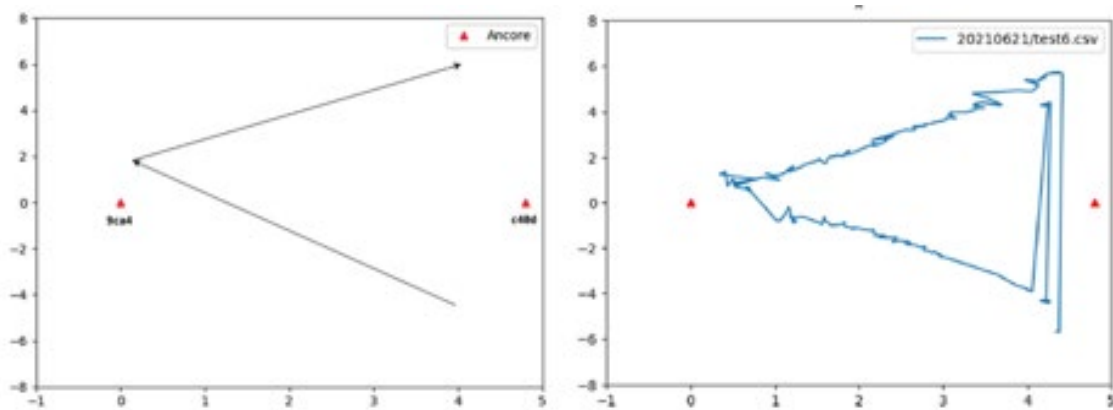


Figura 4.2-8 Risultati sperimentali dell'algorithmo di localizzazione *indoor* con 2 ancore UWB con movimento angolare del target

Come è possibile notare dai grafici riportati nelle immagini (vedi Figura 4.2-5, Figura 4.2-6, Figura 4.2-7 e Figura 4.2-8), installando solamente due ancore UWB posizionate frontalmente una rispetto all'altra è possibile ottenere ottimi risultati in un ambiente non troppo esteso, precisamente rimanendo nell'area di copertura delle ancore UWB stesse.

Si è deciso quindi di proseguire con lo sviluppo dell'algorithmo in modo che potesse essere adattabile ad un ambiente più generico, ipotizzando che le due ancore UWB in visibilità potessero cambiare la propria posizione relativa, mentre il target continua a muoversi all'interno dell'ambiente coperto dalle ancore stesse. L'algorithmo è stato quindi testato posizionando 3 ancore UWB, alcune delle quali molto lontane tra di loro, al limite della copertura della singola ancora, e non più una di fronte all'altra. Durante il proprio tragitto, il carrello aveva quindi in visibilità, ad ogni istante, solamente due ancore UWB.

In Figura 4.2-9 e Figura 4.2-10 sono riportati i risultati ottenuti in questo scenario, con percorsi differenti del nodo target. Per ogni test vengono riportati due grafici: a sinistra il percorso reale del target, a destra la posizione stimata dall'algorithmo di localizzazione. In ogni grafico, come nel caso precedente, le distanze evidenziate su entrambi gli assi di riferimento sono espresse in metri.

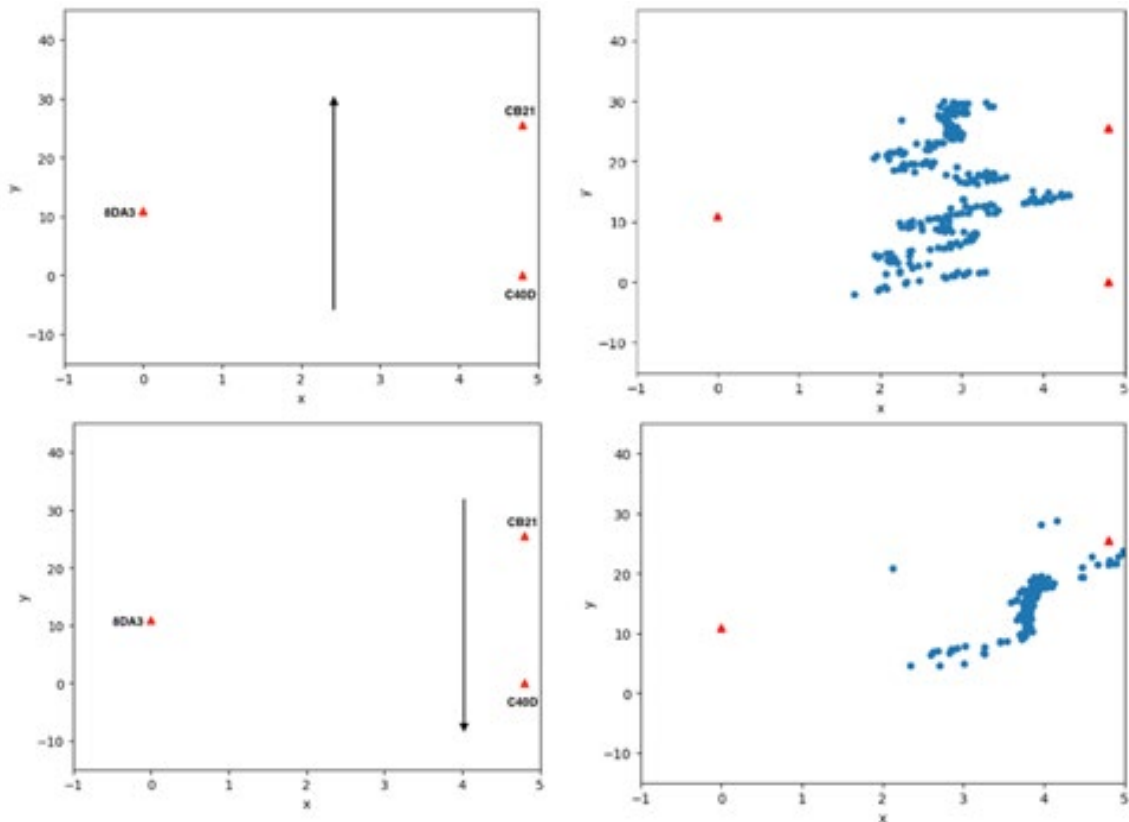


Figura 4.2-9 Risultati sperimentali dell'algoritmo di localizzazione *indoor* con 3 ancore UWB e movimento rettilineo del target (considerando entrambe le direzioni possibili)

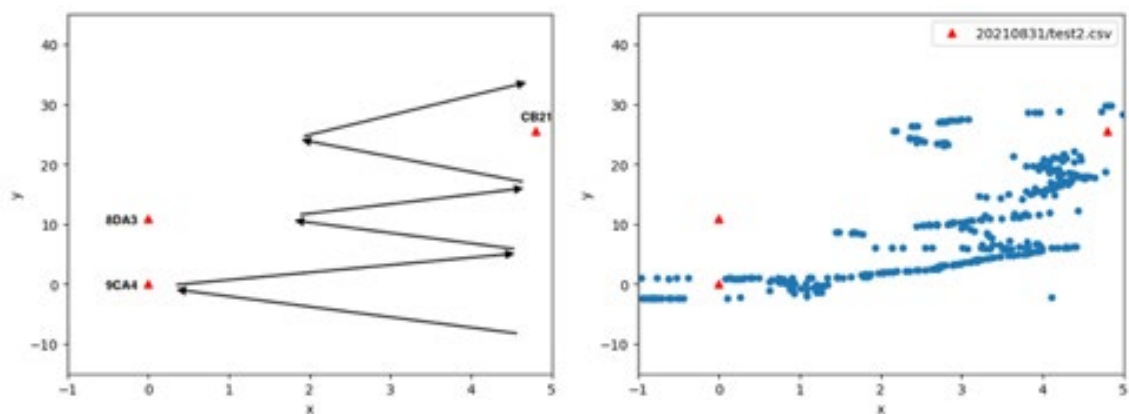


Figura 4.2-10 Risultati sperimentali dell'algoritmo di localizzazione *indoor* con 3 ancore UWB e movimento del target a zig zag

Dagli esperimenti effettuati si nota come la disposizione delle ancore UWB nell'ambiente influisca in modo significativo sulle prestazioni del sistema, soprattutto quando si pongono al limite della copertura delle ancore UWB. In particolare, è possibile notare come nei casi in cui la distanza tra le ancore è maggiore di 10 m, le prestazioni siano piuttosto scarse.

Si è quindi proceduto ad eseguire test con una disposizione delle ancore UWB "a griglia", con cop-

pie di ancore posizionate in posizione frontale. In Figura 4.2-11 e Figura 4.2-12 sono riportati i risultati ottenuti, con due percorsi del carrello.

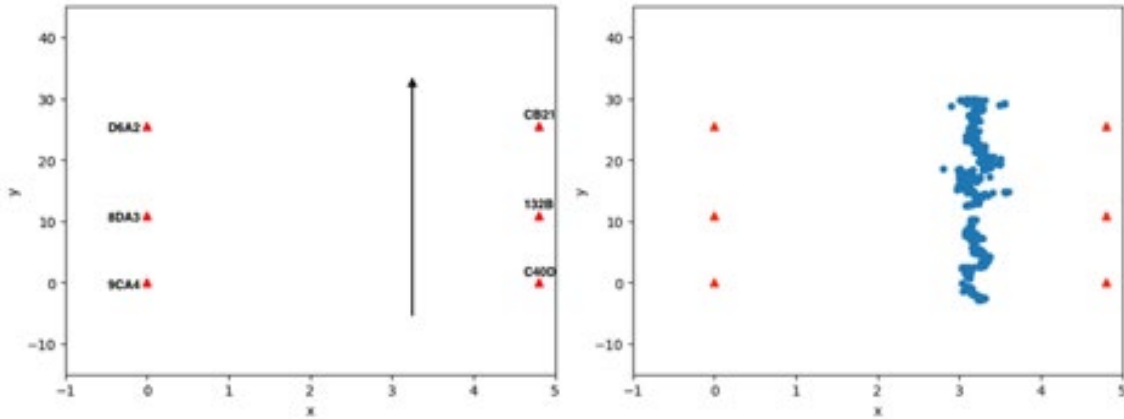


Figura 4.2-11 Risultati sperimentali dell’algoritmo di localizzazione *indoor* con N ancore UWB organizzate a “griglia” e movimento lineare del target

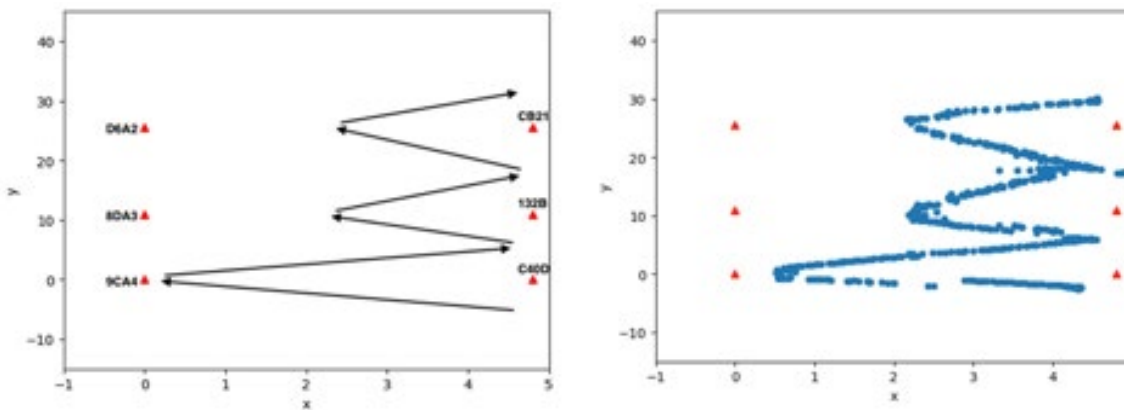


Figura 4.2-12 Risultati sperimentali dell’algoritmo di localizzazione *indoor* con N ancore UWB organizzate a “griglia” e movimento del target a zig zag

Come si può notare dai grafici, la precisione del sistema di localizzazione *indoor* migliora notevolmente quando le ancore UWB sono dislocate “a griglia”. Questo è coerente con le prestazioni molto buone, mostrate in Figura 4.2-5, Figura 4.26, Figura 4.2-7 e Figura 4.2-8 già ottenute dall’algoritmo quando nell’ambiente erano posizionate solamente due ancore UWB una di fronte all’altra.

La disposizione delle ancore risulta quindi essere un aspetto chiave per la buona qualità dei risultati e sarà ulteriormente analizzato nella progettazione delle dimostrazioni.

Le attività del periodo successivo hanno quindi riguardato la prosecuzione dello sviluppo e l’ottimizzazione delle capacità dell’algoritmo di localizzazione, con particolare attenzione alle seguenti funzionalità:

- affinamento dell’algoritmo per aumentarne la robustezza contro eventuali outlier, e verifica del

- funzionamento negli scenari in cui il nodo target non è posizionato su un carrello, ma è “indossato” da una persona mentre cammina nello spazio monitorato;
- implementazione dell’algoritmo in modalità “real-time”, così che i calcoli necessari alla definizione della posizione non debbano avvenire in post processing;
 - implementazione della componente *software* per l’invio periodico delle informazioni di posizione al *Web server* remoto;
 - inizio della parte di integrazione con il modulo di localizzazione *outdoor*.

Dopo gli aggiornamenti *software* sono state effettuate ulteriori campagne di acquisizione dati, per verificare il funzionamento e le prestazioni ottenute.

Come nelle campagne di acquisizione precedenti, sono stati effettuati differenti test, posizionando le ancore in locazioni differenti, ed effettuando movimenti/percorsi diversi.

Come in precedenza, i test della versione aggiornata dell’algoritmo sono stati effettuati presso la Sede Scientifica del DIA dell’Università di Parma. Più nel dettaglio, si è scelto di utilizzare il corridoio principale del DIA, in cui sono state installate un numero variabile di ancore UWB, tutte posizionate ad una altezza di circa 2 m. Nelle immagini seguenti (da Figura 4.2-13 a Figura 4.2-16) sono stati riportati i risultati dei test ottenuti con diverse configurazioni; in particolare, per ogni test vengono riportati due grafici: il grafico a sinistra mostra il percorso reale del target indicato con una freccia, mentre il grafico a destra mostra il percorso ricostruito dall’algoritmo di localizzazione. In ogni grafico, l’unità di misura degli assi è il metro.

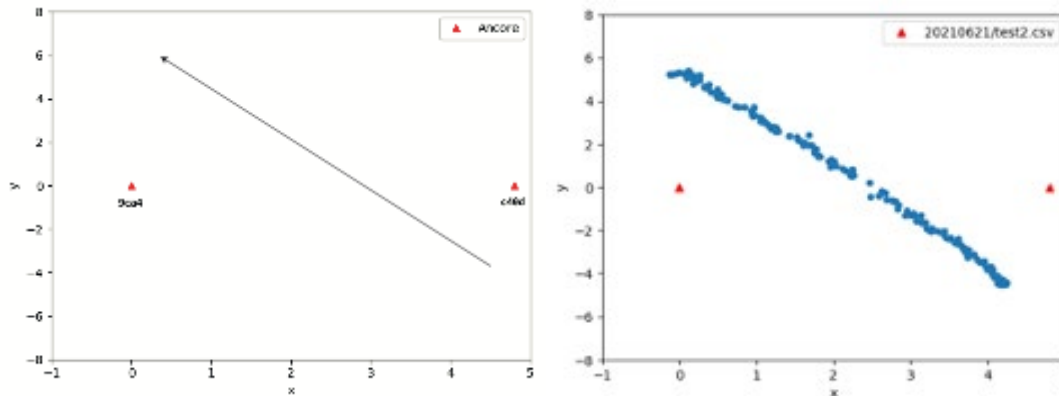


Figura 4.2-13 Risultati sperimentali dell’algoritmo di localizzazione *indoor* in real time con due ancore e movimento del target in obliquo

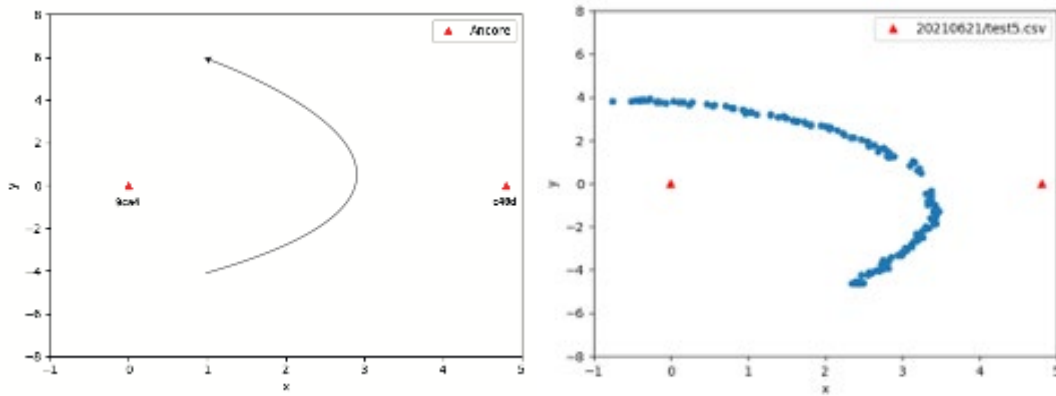


Figura 4.2-14 Risultati sperimentali dell’algoritmo di localizzazione *indoor* in real time con due ancore e movimento del target in curvilineo

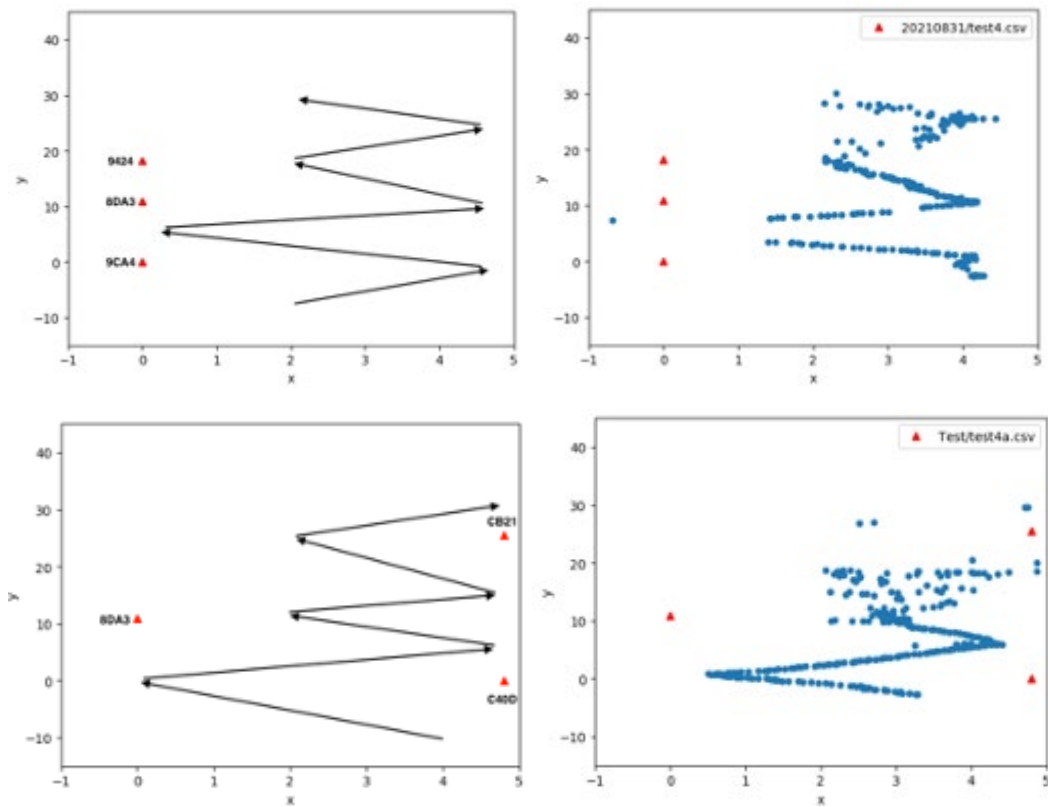


Figura 4.2-15 Risultati sperimentali dell’algoritmo di localizzazione *indoor* in real time con tre ancore in diverse configurazioni e movimento del target a zig zag

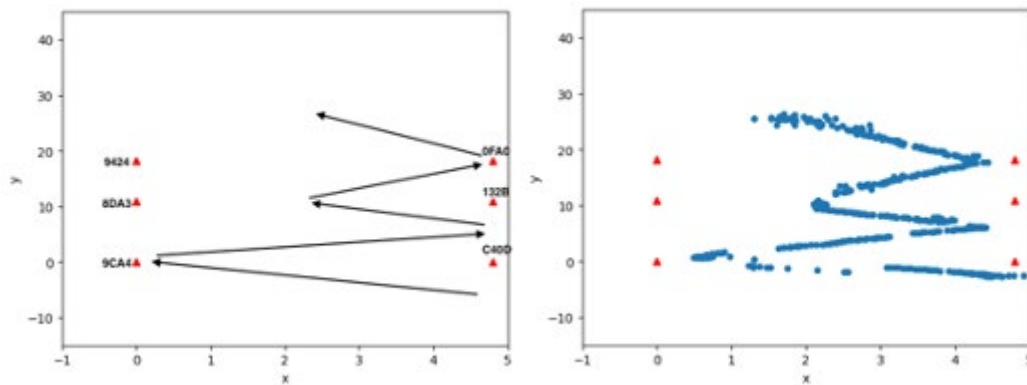


Figura 4.2-16 Risultati sperimentali dell'algorithm di localizzazione *indoor* in real time con 6 ancore posizionate a griglia e movimento del target a zig zag

I risultati mostrati da Figura 4.2-12 a Figura 4.2-16 mostrano come le prestazioni siano del tutto accettabili e confrontabili con le prove precedenti anche introducendo ulteriore complessità nell'implementazione dell'algorithm come il calcolo della posizione in tempo reale e l'invio dei dati al sistema di controllo.

In Figura 4.2-17 è riportato il posizionamento di 6 ancore UWB nella porzione di corridoio adiacente all'ingresso dell'edificio della sede del DIA. In Figura 4.2-18 e Figura 4.2-19 sono riportati i risultati ottenuti con due diversi percorsi che simulano l'ingresso di un operatore in un edificio. I risultati ottenuti mostrano come sia possibile localizzare con sufficiente precisione un operatore che si muove "indossando" il nodo sviluppato, che in questo caso non è più fissato rigidamente su un carrello.

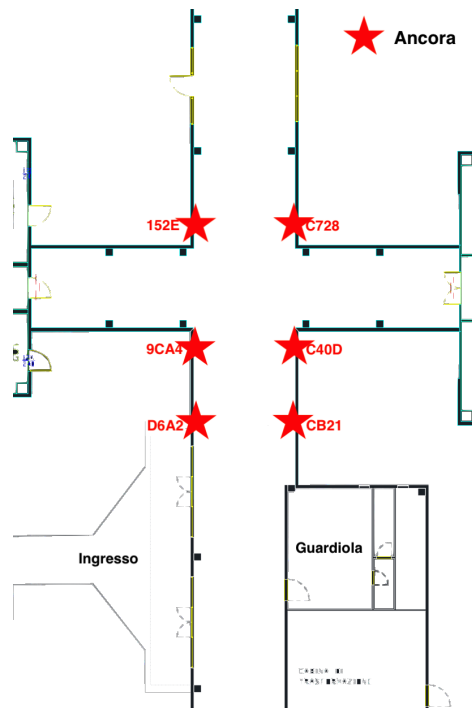


Figura 4.2-17 Posizionamento delle ancore presso il DIA dell'Università di Parma

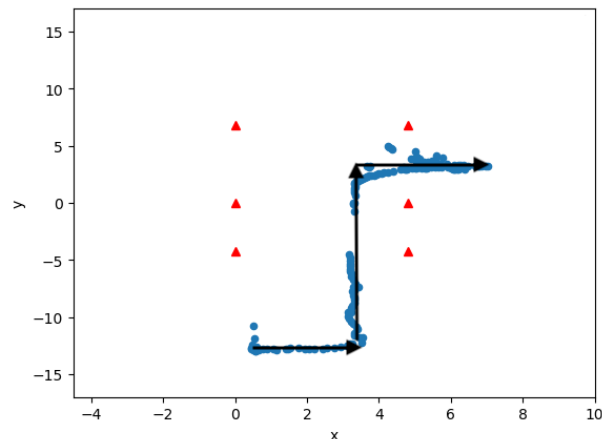


Figura 4.2-18 Risultati sperimentali ottenuti dall'algoritmo di localizzazione *indoor* simulando l'ingresso nella sede del DIA dell'Università di Parma

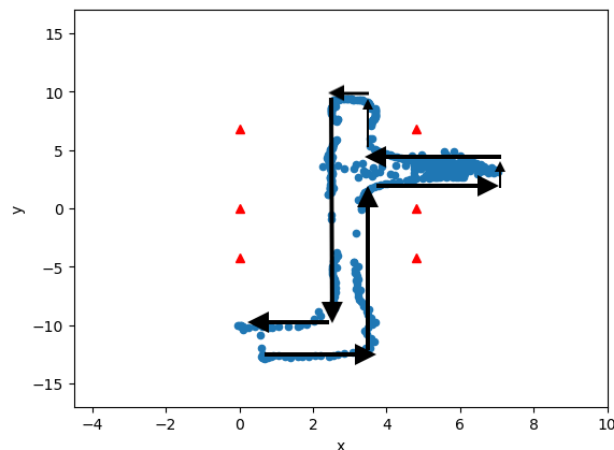


Figura 4.2-19 Risultati sperimentali ottenuti dall'algoritmo di localizzazione *indoor* simulando l'ingresso nella sede del DIA dell'Università di Parma

4.3 Sistema di localizzazione per lo scenario outdoor

Il sistema di localizzazione per lo scenario *outdoor* è basato sull'utilizzo di dati satellitari ottenuti secondo due modalità: localizzazione tramite GNSS e localizzazione tramite sistemi RTK. La localizzazione tramite GNSS può essere considerata come "*stand-alone*", in quanto l'unico requisito per il nodo target è quello di essere dotato di un ricevitore GNSS. I sistemi RTK presuppongono invece un'infrastruttura aggiuntiva, ovvero richiedono la presenza di una *base station*, che viene utilizzata come riferimento dal target (denominato *rover* secondo la terminologia RTK), in aggiunta alle informazioni provenienti dal sistema satellitare. In Figura 4.3-1 è mostrato il funzionamento di un generico sistema RTK.

- La prima entità, definita *base station*, è una stazione fissa di cui deve essere nota a priori la posizione (in termini di coordinate geografiche) e che deve essere dotata di una buona visibilità rispetto al cielo (cioè verso i satelliti). Le coordinate della *base station*, se non note a priori, possono essere recuperate attraverso un meccanismo basato su un'opportuna elaborazione dei dati satellitari per un periodo di osservazione denominato "*survey-in*".

- La seconda entità, denominata *rover* e corrispondente al *target* (come anticipato sopra), è generalmente in movimento ed è l'entità (nel caso del progetto attuale una persona o un mezzo semovente) di cui si vuole stimare la posizione. Per ottenere buone prestazioni (in termini di accuratezza di localizzazione), è necessario che anche il *rover* abbia una buona visibilità rispetto al sistema satellitare GNSS.

Il principio di funzionamento del sistema RTK prevede che il *rover* riceva informazioni di correzione della posizione dalla *base station*, migliorando quindi la precisione di localizzazione che potrebbe raggiungere utilizzando solamente il proprio ricevitore GNSS. La comunicazione tra *base station* e *rover* avviene generalmente tramite antenne UHF ed i messaggi scambiati seguono il formato dati definito dallo standard RTCM3 [Wub-006].

In base alle condizioni ambientali ed al numero di satelliti in visibilità per *base station* e *rover*, il risultato di localizzazione di un sistema RTK (identificato come “stato”) può essere uno delle tre seguenti tipologie, con un livello di accuratezza crescente [NgK-018].

- Stato “*autonomous*”: il *rover* non è in grado di ricevere le correzioni dalla *base station*. Il posizionamento è pertanto basato solamente sul ricevitore GNSS del *rover*;
- Stato “*float*”: il *rover* riceve le correzioni dalla *base station*, ma non ha in visibilità un numero sufficiente di satelliti (in comune con la base station) per il calcolo accurato del posizionamento;
- Stato “*fixed*”: il *rover* riceve le correzioni dalla *base station* ed entrambi hanno in comune un numero sufficiente di satelliti per ottenere la massima precisione, che nominalmente è dell'ordine dei centimetri ($1 \div 5$ cm in condizioni ideali).

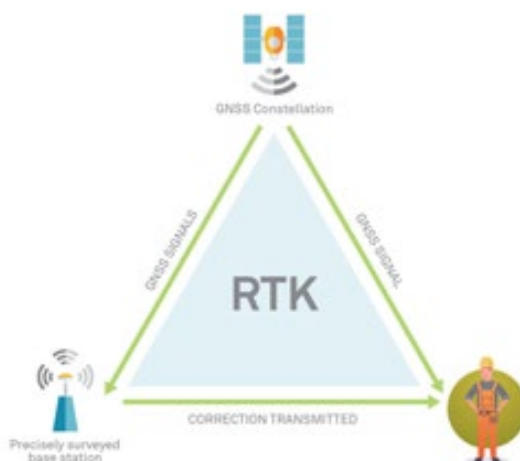


Figura 4.3-1 Funzionamento di base di un generico sistema di localizzazione RTK

Nell'ambito del progetto, quale modulo RTK è stato adottato il chip NEO-M8P-2 già presente nel kit u-blox “C94-M8P RTK *application board* package”, un sistema COTS utilizzato per la creazione del prototipo e per i test sperimentali. Tale sistema di valutazione è composto dai seguenti componenti:

- 2 *application board* basate sul chip NEO-M8P-2: queste *board* sono del tutto identiche, e possono essere utilizzate per creare sistemi RTK dove ognuna delle due *board* può agire da *base*

station o da *rover*. Per funzionare correttamente, queste board devono essere connesse, tramite cavo USB, ad un “*host*” (es. un computer).

- 2 antenne UHF esterne da connettere alle due *board*, per lo scambio dei messaggi di correzione RTCM3 tra *base station* e *rover*.
- 2 antenne GNSS per la ricezione del segnale satellitare, in grado di ricevere segnali da sistemi satellitari GPS, GLONASS L10F, BeiDou B1I, Galileo. Nel sistema corrente sono stati abilitati i sistemi di localizzazione satellitare GPS, GLONASS e Galileo.

Il pacchetto *software* u-center disponibile per la configurazione e la visualizzazione in tempo reale dei dati di localizzazione associati alle board è un *software* di valutazione che permette anche di memorizzare (tramite opportuni file di log) ed esportare i dati raccolti.

La prima fase dell'attività ha riguardato lo studio e l'analisi del funzionamento delle board RTK C94-M8P, per valutarne le prestazioni e l'applicabilità negli scenari identificati. In particolare, sono state valutate le prestazioni in condizioni ambientali differenti e con diverse tipologie di antenne GNSS. In questa prima fase del lavoro, per la configurazione delle board u-blox e per la raccolta e la visualizzazione dei dati di localizzazione è stato utilizzato il *software* u-center.

In Figura 4.3-2 è riportato il setup del prototipo *base station* per la prima campagna di acquisizione dati con le antenne già presenti nel kit di valutazione. Come si può vedere, la *base station* è stata posizionata ad una altezza di circa 3 m sul tetto di un box, senza significativi ostacoli nelle vicinanze. Successivamente è stato avviato il processo di survey-in tramite *software* u-center. La durata dell'acquisizione è stata di circa 7 ore, ottenendo una precisione di 0,3 m.



Figura 4.3-2 Posizionamento e set-up della *base station* del sistema RTK nella prima campagna di acquisizione dati

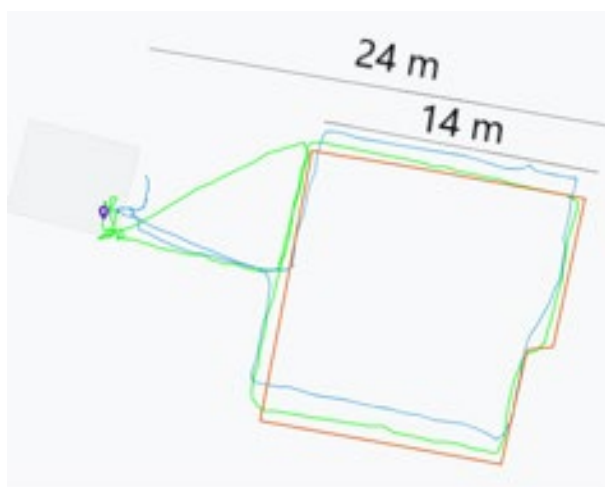


Figura 4.3-3 Confronto tra i sistemi RTK e GNSS nella prima campagna di acquisizione dati: percorso vero (linea verde) e stimato (linea blu per GNSS e lineare verde per RTK)

In Figura 4.3-3 sono stati quindi riportati i risultati ottenuti dal confronto tra i due sistemi di localizzazione. Più nel dettaglio, in arancione è stato riportato il percorso reale del target, in blu la stima della localizzazione con il solo sistema GNSS, mentre in verde la stima della localizzazione con sistema RTK. In questa campagna di acquisizione, l'errore del sistema GNSS si può stimare in un intervallo tra 80 cm e 180 cm, mentre per il sistema RTK l'errore si attesta in un intervallo compreso tra 25 cm a 60 cm.

Successivamente, è stata fatta un'ulteriore campagna di acquisizione dati per verificare quanto la qualità dell'antenna GNSS influenzi le prestazioni del sistema RTK. In particolare, è stata selezionata, come antenna di fascia alta, l'antenna Taoglas MA130.

In Figura 4.3-4 è riportato il percorso reale relativo alla seconda campagna di acquisizione dei dati. La *base station* è stata fissata a terra con base metallica per migliorare la ricezione del segnale satellitare, ed il processo di survey-in è stato attivato con una durata di 15 minuti ed una precisione di 1.5 m.

Il percorso, che ha una lunghezza complessiva di circa 470 m, con anche alcuni ostacoli nelle vicinanze (alberi, edifici), è stato eseguito a piedi, mantenendo l'antenna GPS del rover a circa 1.5 m da terra. La distanza massima tra *base station* e rover ha raggiunto il valore di circa 110 m. In Figura 4.3-5 è mostrato il confronto tra diversi sistemi. In particolare:

- in rosso è riportato il percorso reale;
- in verde chiaro è riportato il percorso eseguito con la sola informazione GNSS;
- in viola è riportata la stima del percorso eseguito con il sistema RTK e l'antenna Taoglass;
- in azzurro è riportata la stima del percorso eseguito con il sistema RTK e l'antenna già presente nel kit u-blox;

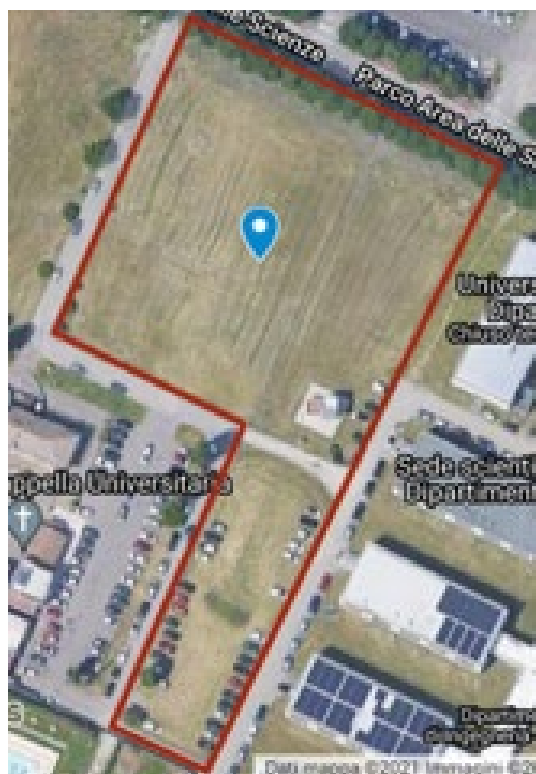


Figura 4.3-4 Percorso reale nella seconda campagna di acquisizione dati

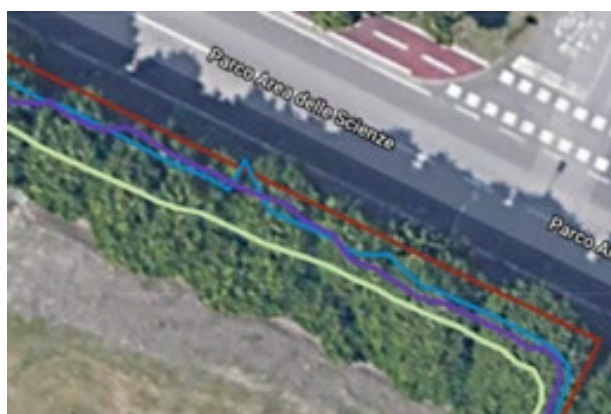


Figura 4.3-5 Confronto tra i sistemi RTK e GNSS nella seconda campagna di acquisizione dati

Dai risultati ottenuti è emerso che l'accuratezza del sistema GNSS si attesta a circa 1 m. L'accuratezza di localizzazione garantita dal sistema RTK è intorno a 0.4 m. La differenza principale tra i due sistemi RTK è che, con l'antenna Taoglass, la modalità RTK *fixed* è risultata essere più stabile. È importante segnalare tuttavia che questa modalità è raggiungibile solamente in condizioni molto favorevoli di visibilità satellitare, mentre la maggior parte delle localizzazioni, durante la seconda campagna di acquisizione, è stata in modalità *float*. Nel seguito vengono forniti ulteriori dettagli sulle modalità di funzionamento *fixed* e *float*.

A valle di queste prove preliminari, il lavoro è proseguito con la definizione del setup hardware per i prototipi dei nodi target e *base station* (mostrati in Figura 4.3-6) nello scenario *outdoor*. I prototipi sono del tutto simili: un singolo nodo è composto dai seguenti componenti:

- 1 Raspberry Pi 3 B+, che svolge la funzione di *host*;
- 1 u-blox C94-M8P RTK *application board*;
- 1 antenna UHF per la trasmissione o la ricezione dei messaggi RTCM3;
- 1 antenna GNSS per la ricezione del segnale satellitare.

Sono stati inoltre valutati ulteriori componenti *wearable* specifici per il prototipo *rover* nel caso dello scenario di localizzazione *outdoor* ove il target corrisponda ad una persona che si muove in ambienti a rischio.

Per quanto riguarda gli aspetti di alimentazione del prototipo di localizzazione *outdoor* sono state utilizzate le seguenti modalità:

- la *base station* è stata alimentata tramite rete elettrica, in quanto è un nodo fisso che fa parte dell'infrastruttura del sistema;
- il *rover* è in generale alimentato tramite un *battery pack* il cui dimensionamento è stato definito in funzione della durata di utilizzo prevista senza ricarica.



Figura 4.3-6 Setup hardware per i prototipi di localizzazione *indoor*

Il *software* a bordo del prototipo del nodo *base station*, sviluppato in linguaggio Python, prevede due modalità di funzionamento, con lo scopo di acquisire le coordinate necessarie al corretto funzionamento del sistema RTK. La prima modalità, denominata “*fixed mode*” permette di inserire delle coordinate già note, mentre la seconda prevede l’attivazione di un processo di “*survey-in*” che permette di acquisire in modo automatico la posizione della *base station*, tramite un periodo di osservazione di durata variabile. Più nel dettaglio, il *survey-in* è configurabile attraverso la definizione di due parametri:

- precisione della posizione;
- tempo minimo di osservazione;

Il processo si conclude una volta che entrambi i requisiti sono stati rispettati.

Il *software* a bordo del prototipo del nodo *rover*, sempre sviluppato in linguaggio Python, è in grado di gestire due diverse modalità di funzionamento. Di norma la posizione viene ottenuta

attraverso il sistema satellitare GNSS “puro”; quando le condizioni ambientali lo permettono (per esempio il *rover* è in visibilità di una *base station* ed è possibile ricevere i messaggi di correzione) il posizionamento passerà alla modalità RTK. Per l’interazione tra scheda *host* e le *board* u-blox, è stato sviluppato il *software* che si occupa (i) dell’invio e della ricezione di messaggi nel formato definito da u-blox e (ii) dell’interpretazione dei messaggi di localizzazione in formato NMEA. L’attività del periodo successivo nel progetto CP-SEC ha dunque riguardato la prosecuzione dell’analisi del funzionamento delle *board* RTK C94-M8P all’interno del prototipo sviluppato, in diversi scenari e l’ottimizzazione del *software* di controllo. In particolare, sono stati individuati nuovi componenti hardware che si potessero adattare meglio allo scenario di monitoraggio di persone. Il setup hardware del prototipo *wearable* per il nodo target dello scenario *outdoor* comprende:

- 1 RPi3, che svolge la funzione di processing unit;
- 1 kit u-blox C94-M8P RTK, *application board* per l’integrazione delle funzionalità RTK;
- 1 antenna UHF *wearable* per la trasmissione e la ricezione dei messaggi RTCM3; il modello utilizzato è l’antenna Octane BW-350-450 (mostrata in Figura 4.3-8);
- 1 antenna GNSS *wearable* per la ricezione del segnale satellitare, modello Octane BW-1575-A GPS L1 Active Antenna (mostrata in Figura 4.3-7);
- alimentazione tramite *battery pack* dimensionato per la copertura di almeno una giornata lavorativa (3.7V, 20000 mAh).



Figura 4.3-7 Antenna GPS indossabile per la localizzazione *outdoor*



Figura 4.3-8 Antenna UHF indossabile per il sistema di localizzazione *outdoor*

A valle di queste modifiche hardware, sono state effettuate diverse campagne di acquisizione dati, per verificare le prestazioni ed il funzionamento del prototipo sia nella versione indossabile, sia nella versione per veicoli in movimento.

In Figura 4.3-9 è mostrato il setup impostato durante le campagne di acquisizione dati. In particolare, nella parte sinistra della Figura, è riportato il posizionamento delle varie componenti del nodo target all'interno di un indumento (giacca invernale). Le antenne indossabili UHF e GNSS sono state posizionate rispettivamente sulla schiena e sulla sommità di un elmetto antinfortunistico da cantiere. Il modulo *base station* ha una composizione simile a quella del target, ad eccezione delle antenne in uso:

- 1 RPi3, che svolge la funzione di processing unit;
- 1 kit u-blox C94-M8P RTK *application board*;
- 1 antenna UHF (inclusa nel kit) per la trasmissione o la ricezione dei messaggi RTCM3;
- 1 antenna GNSS (inclusa nel kit) per la ricezione del segnale satellitare;
- alimentazione tramite *battery pack*, in quanto nella posizione prescelta non era disponibile alimentazione da rete elettrica.

Come mostrato in Figura 4.3-9, la *base station* è stata quindi installata all'esterno del DIA, utilizzando un palo dell'altezza di circa 5 metri per il posizionamento dell'antenna GPS, in modo da garantire un'ottima visibilità satellitare.

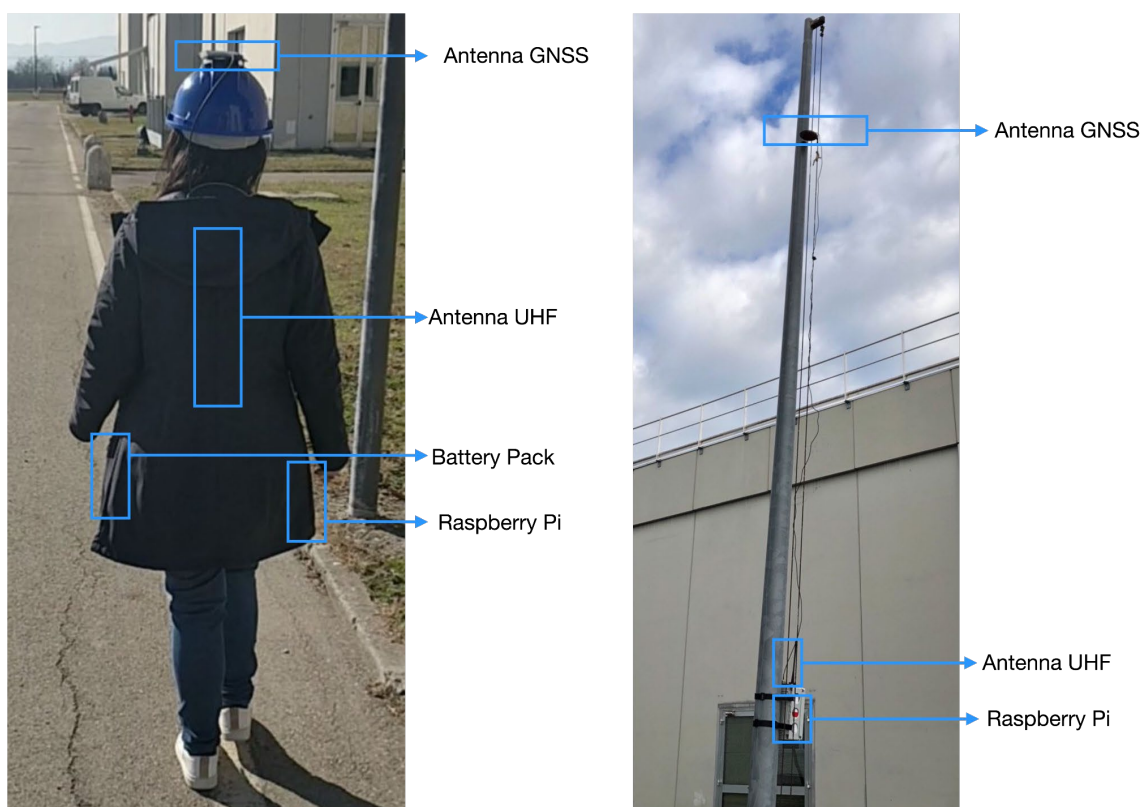


Figura 4.3-9 Setup hardware per la campagna di acquisizione dati presso la sede DIA dell'Università di Parma. Sulla destra è mostrato il set-up per la *base station*, mentre sulla sinistra il prototipo indossato

Si è proceduto quindi ad una serie di acquisizioni dati lungo il percorso a piedi, mostrato in Figura 4.3-10, della durata di circa 7 minuti nell'area circostante la *base station*, coprendo una distanza totale di circa 480 m. I risultati raccolti dalle prove hanno evidenziato come, con il setup installato, sia pos-

sibile ottenere il monitoraggio di una persona che si muove a piedi, con un errore di localizzazione inferiore al metro. I tratti che si sono rivelati associati ad un errore di localizzazione maggiore sono quelli più vicini agli edifici, in cui la ricezione del segnale satellitare peggiora generando dei punti di deviazione rispetto al percorso (come mostrato nelle aree segnalate in colore rosso in Figura 4.3-10).

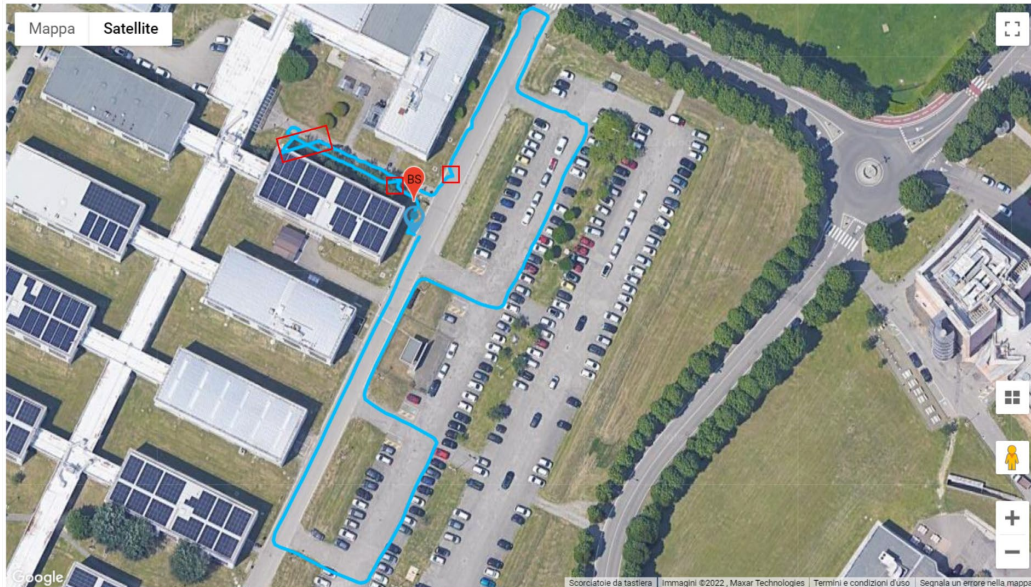


Figura 4.3-10 Percorso pedonale seguito durante l'acquisizione dati presso il DIA

Una seconda serie di esperimenti ha riguardato la raccolta dati lungo un percorso eseguito in autovettura, della durata di circa 10 minuti, percorrendo una distanza totale di circa 2 km, come mostrato in Figura 4.3-11. La distanza massima (in linea d'aria) tra la *base station* e l'autovettura utilizzata come target è stata di circa 220 metri. I risultati raccolti hanno mostrato come la localizzazione RTK di veicoli semoventi rimanga affidabile, nell'ambito della copertura delle antenne UHF.



Figura 4.3-11 Percorso in auto seguito durante l'acquisizione dati presso il campus dell'Università di Parma

4.4 Prototipo di localizzazione integrato

Dopo aver completato l'attività di sviluppo dei diversi algoritmi di localizzazione, è iniziata la fase di integrazione del prototipo, il cui risultato è mostrato in Figura 4.4-1.



Figura 4.4-1 Prototipo di localizzazione integrato

Tale dispositivo, che è stato utilizzato nelle successive attività di test, include i seguenti componenti:

- 1 RPi3, che svolge la funzione di *host*;
- 1 modulo u-blox C94-M8P RTK *application board*;
- connettori per 1 antenna UHF e 1 antenna GNSS;
- 1 modulo IMU, in dettaglio Bosch BNO055, inclusiva di accelerometro, giroscopio e magnetometro;
- 1 modulo UWB di tipo Decawave DWM1001.

A seconda del tipo di installazione (monitoraggio di persone o mezzi), il prototipo può essere completato con le antenne ed i componenti necessari all'alimentazione più adatti.

5 Identificazione delle interfacce di comunicazione dei sistemi sensoriali sviluppati

Nell'ambito dei sistemi che sfruttano le tecnologie IoT, i possibili protocolli di comunicazione wireless utilizzabili sono estremamente eterogenei. Nella prima parte della attività del progetto CP-SEC sono state quindi valutate varie opzioni, per trovare la soluzione più adatta agli scenari identificati. Nell'ambito dello scenario di progetto, le caratteristiche richieste al protocollo di comunicazione per il trasferimento delle informazioni legate alla localizzazione di persone e mezzi sono le seguenti:

- copertura a medio - lungo raggio;
- possibilità di adattarsi ad ambienti misti *indoor e outdoor*;

- consumi contenuti (per esempio, per poter coprire un singolo turno di lavoro);
- frequenza di invio dei dati, con un tasso compatibile ad un target in movimento con una velocità variabile.

Sono stati valutati i seguenti principali protocolli di comunicazione:

- Lungo raggio: LoRaWAN (derivato dalla soluzione proprietaria LoRa di SemTech), NB-IoT, derivato dallo standard 3GPP 4G come soluzione a copertura globale che si appoggia alla rete cellulare, comunicazioni di tipo cellulare “puro” (4/5G). Si precisa che mentre LoRaWAN e NB-IoT sono protocolli di comunicazione a basso bit-rate, un sistema cellulare garantisce potenzialmente bit rate molto elevate.
- Medio raggio: WiFi, Bluetooth o Bluetooth Low Energy (BLE). In questo caso, i protocolli indicati consentono trasferimento di informazioni ad elevata bit rate.

Dopo la valutazione di diversi dei principali protocolli di comunicazione, per lo scenario di localizzazione, si è scelto di utilizzare la tecnologia Wi-Fi, in quanto consente di inviare i dati di posizione con un *data rate* compatibile anche nel caso di veicoli in movimento.

Dalle prove effettuate nell’ambito della localizzazione *indoor e outdoor*, la frequenza di invio della posizione scelta è di 1 dato al secondo, come compromesso tra i consumi energetici dei nodi e la continuità di monitoraggio dei target.

5.1 Valutazione delle prestazioni di reti wireless eterogenee per la trasmissione dati verso il server

In Figura 5.1-1 è riportato un confronto tra diverse tecnologie di comunicazione *wireless* compatibili con scenari IoT, in termini di *range* trasmissivo, costo e *data rate*. Tenendo in considerazione gli specifici vincoli degli scenari descritti e le caratteristiche del sistema finale di localizzazione per scenari misti *indoor-outdoor* in via di sviluppo, si è scelto di utilizzare il protocollo WiFi per la comunicazione dei dati relativi alla localizzazione *indoor e outdoor*. In particolare, i dati vengono inviati attraverso la chiamata ad API (*Application Programming Interface*) REST (*REpresentational State Transfer*) che risiedono sul *server* HTTP [Bat-008]. Gli aspetti più significativi che hanno guidato questa scelta sono i seguenti:

- nessun vincolo di *duty cycle* e *data rate*, di modo da rendere possibile l’adattamento a target che si muovono con maggiore velocità;
- versatilità, in quanto la strategia di comunicazione proposta può essere adottata sia in scenari *indoor* che *outdoor*;
- costi contenuti;
- alto grado di interoperabilità e versatilità;
- affidabilità e sicurezza.

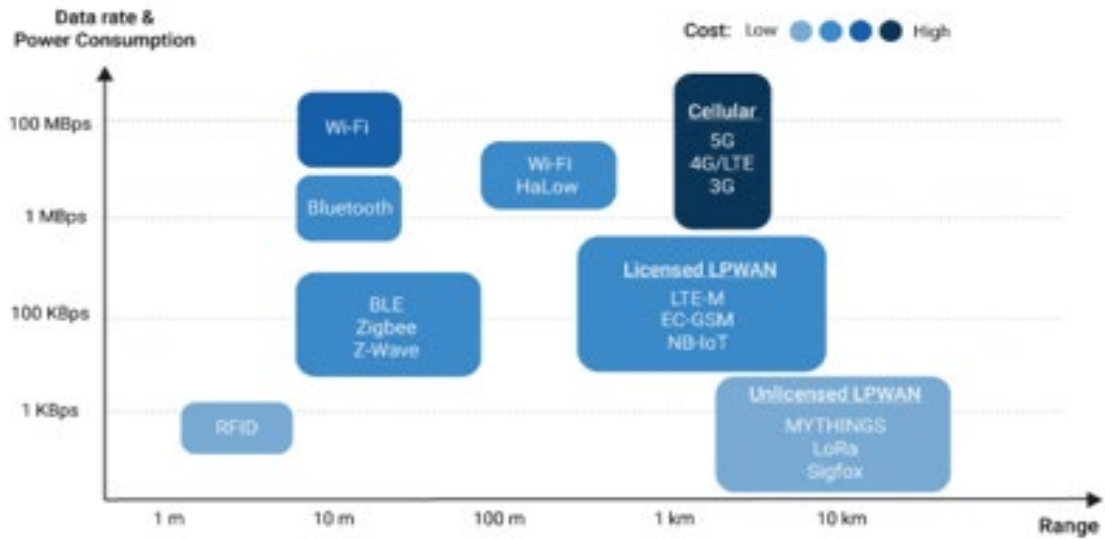


Figura 5.1-1 Confronto, in termini di bit-rate e range trasmissivo, tra varie tecnologie di comunicazione wireless compatibili con scenari IoT. La gradazione del colore di ogni tecnologia è associata al costo corrispondente

Le campagne di acquisizione dati descritte nelle sezioni precedenti presuppongono quindi la presenza di una rete Wi-Fi che copra l'area da monitorare.

I moduli *base station* e target sono quindi connessi ad Internet per l'invio dei dati di localizzazione (*indoor e outdoor*) al server remoto tramite le API HTTP.

5.2 Integrazione dei sistemi sensoristici con i sistemi di comunicazione

I sistemi di localizzazione sviluppati sono stati integrati all'interno dell'architettura generale dell'intero sistema. L'attività di integrazione ha portato alla definizione e all'implementazione dell'architettura generale mostrata in Figura 5.2-1.

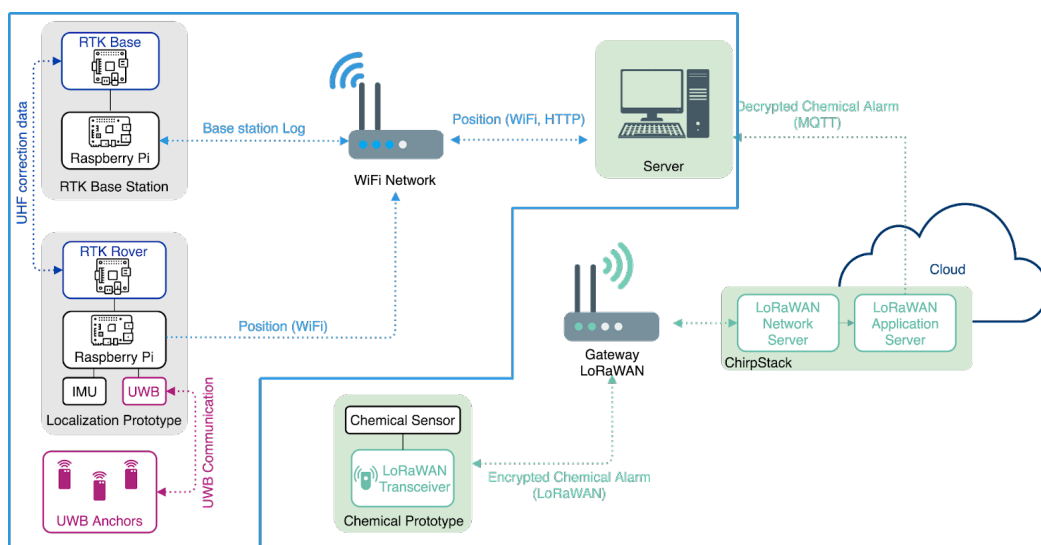


Figura 5.2-1 Architettura generale per il flusso dati nello scenario del progetto CP-SEC

In Figura 5.2-1 sono mostrati i diversi flussi dati tra le diverse entità attive negli scenari identificati. In particolare, la comunicazione tra *base station*, *rover* ed il server centrale viene affidata al protocollo HTTP, ipotizzando che l'ambiente abbia una copertura Wi-Fi estesa su tutte le aree (sia *indoor* che *outdoor*) dove è richiesto il monitoraggio. Nel caso di assenza di copertura, una soluzione che può essere adottata è quella di utilizzare uno *smartphone* in modalità *hotspot* a cui si possa collegare il target o un *access point* dotato di una SIM mobile.

6 Sviluppo di una nuova generazione di unità di supervisione di campo

Tra gli obiettivi del progetto CP-SEC, uno tra i più rilevanti è lo sviluppo di un'unità di supervisione che permetta di acquisire la grande quantità di dati provenienti dall'ambiente fisico prodotti dai sensori sviluppati nel progetto e di elaborarli in tempo reale per estrarre in maniera automatica informazioni utili alla gestione della sicurezza. In particolare, sono state realizzate due tipologie di procedure differenziate: (i) basata sull'impostazione di una configurazione di base delle entità da monitorare (riferendosi a persone e mezzi) e delle aree pericolose o non consentite, che può essere riconfigurata ad esempio nel caso sia previsto l'arrivo di un grosso automezzo, e/o sia presente un cantiere mobile nello stabilimento con relativa area di confinamento; oppure (ii) basata sull'individuazione di allarmi real-time provenienti dai sensori chimici.

L'attività di definizione dei protocolli più adatti per il trasferimento dei dati nel *cloud* ha portato all'utilizzo del protocollo HTTP per il trasferimento dei dati al server remoto, sia per quel che riguarda i dati di localizzazione *outdoor* e *indoor*, sia per quel che riguarda i dati legati al rilevamento di gas potenzialmente pericolosi.

6.1 Definizione dell'architettura e delle funzionalità dell'unità di supervisione di campo

In Figura 6.1-1 è mostrata l'architettura definita in collaborazione tra i partner Università di Siena e Università di Parma.

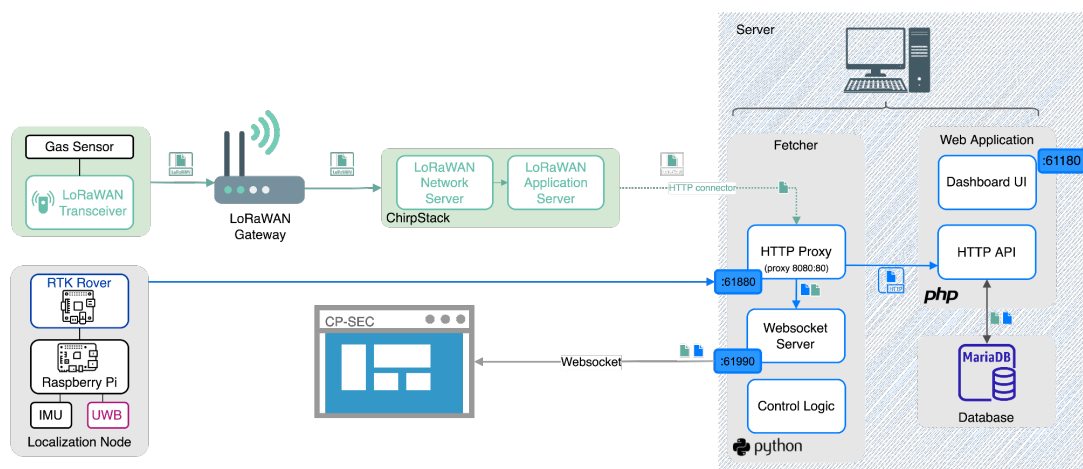


Figura 6.1-1 Architettura per l'invio dei dati al server remoto del progetto CP-SEC

I requisiti *software* e le tecnologie selezionati per la creazione del *server* remoto sono i seguenti:

- Apache HTTP Server, quale server Web per l'esposizione di API e servizi [Apa-022];
- PHP7, quale linguaggio di programmazione per lo sviluppo delle API HTTP;
- MariaDB, quale database per la memorizzazione persistente dei dati;
- Python 3.8, quale linguaggio di programmazione per lo sviluppo del componente *software* denominato *Fetcher*.

La struttura della base di dati di tipo relazionale a supporto dell'unità di controllo è stata definita sulla base della struttura di tabelle così come descritto in seguito e come mostrato in Figura 6.1-2. La tabella *user* contiene l'elenco degli utenti che possono accedere alla *dashboard* web dell'unità di controllo. Per ogni utente è possibile definire le credenziali di accesso.

La tabella *site* definisce i siti di monitoraggio che possono corrispondere ad aziende o aree di lavoro generiche in cui il sistema viene installato.

La tabella *node* contiene l'elenco dei nodi IoT utilizzati nel sistema, con la tipologia corrispondente. Le tipologie possibili sono state definite per rappresentare, al momento, i nodi IoT per il rilevamento di gas, i nodi di localizzazione *indoor* e *outdoor*, ed i nodi con la funzionalità di *base station* RTK. La tabella *user_has_site* permette di associare gli utenti del sistema ad uno o più siti di installazione, mentre la tabella *site_has_node* permette di associare i nodi sensoriali ad uno o più siti di installazione.

Le tabelle *indoor_data*, *outdoor_data* e *gas_data* contengono rispettivamente i dati raccolti dai nodi di localizzazione *indoor*, dai nodi di localizzazione *outdoor*, e dai nodi di rilevamento gas. Sono infine state definite due tabelle di "setup" per memorizzare le informazioni legate all'infrastruttura necessaria alla localizzazione (posizionamento delle ancore, limiti delle aree monitorate, possibili aree non consentite, ecc...).

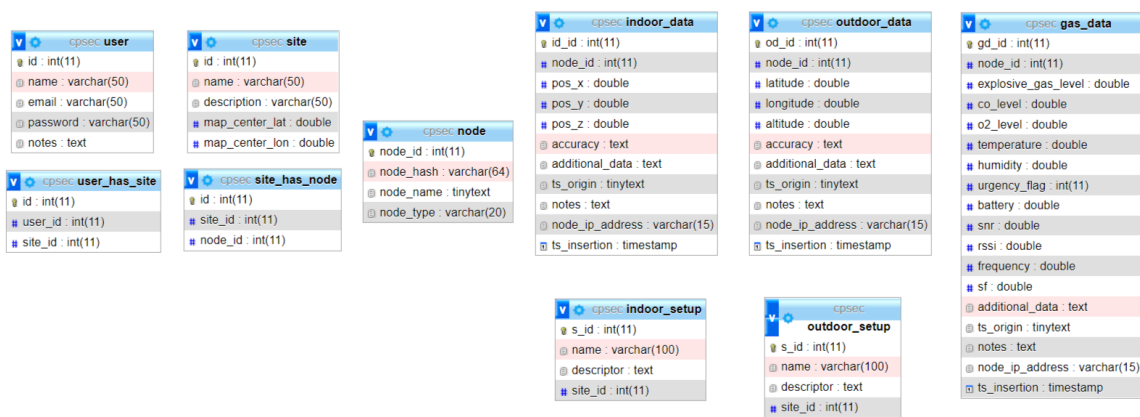


Figura 6.1-2 Tabelle del database relazionale per l'unità di supervisione del progetto CP-SEC

6.2 Sviluppo software della unità di supervisione di campo

Una volta definita l'architettura generale del sistema, è iniziata l'attività di sviluppo *software*, con l'obiettivo di salvare i dati in arrivo dai nodi sensoriali in modo persistente, e fornire una loro rappresentazione grafica, attraverso la *dashboard* Web.

Gli *end point* delle API HTTP sviluppati (eventualmente estendibili a seconda delle necessità) sono i seguenti:

post /api/outdoor/location: per l'invio dei dati dal sistema di localizzazione *outdoor* da parte dei nodi IoT.

post /api/base_station/status: per l'invio dei dati di diagnostica dal nodo *base station*.

post /api/indoor/location: per l'invio dei dati dal sistema di localizzazione *indoor* da parte dei nodi IoT.

post /api/gas/data: per l'invio dei dati dai sensori di monitoraggio gas.

Le API HTTP sono state implementate utilizzando il linguaggio PHP ed il framework CodeIgniter [Cod-022], seguendo il paradigma Model-View-Controller (MVC) [Lef-001]. L'implementazione attuale verrà estesa nei mesi successivi per coprire tutte le funzionalità del sistema di supervisione (ad esempio con una serie di chiamate di tipo GET per la visualizzazione dei dati storici).

Per permettere la visualizzazione immediata dei dati, è stato sviluppato un modulo *Fetcher*, utilizzando il linguaggio Python, che, all'arrivo di un nuovo dato da uno qualsiasi dei nodi IoT, ha il duplice compito di:

- agire come proxy HTTP, inoltrando i dati alle API REST per il loro salvataggio nella base di dati;
- agire come WebSocket *server*, inoltrando i dati a tutti i client eventualmente connessi tramite l'interfaccia Web.

L'attività di sviluppo della *dashboard* Web è stata svolta in collaborazione tra i partner Università di Siena e Università di Parma. Anche questo modulo *software* è stato sviluppato in PHP, utilizzando il *framework* CodeIgniter.

La Figura 6.2-1 mostra la pagina principale della *dashboard*, visibile dopo la procedura di login e selezione del sito di installazione in cui, nella parte superiore, sono mostrati i box relativi ai dati puntuali dei vari nodi IoT. Nella parte a sinistra sono mostrati i dati relativi alla localizzazione *outdoor* su una mappa di Google Maps, mentre a destra sono mostrati i dati di localizzazione *indoor* come coordinate (x, y) rispetto alla planimetria dell'ambiente reale da monitorare.

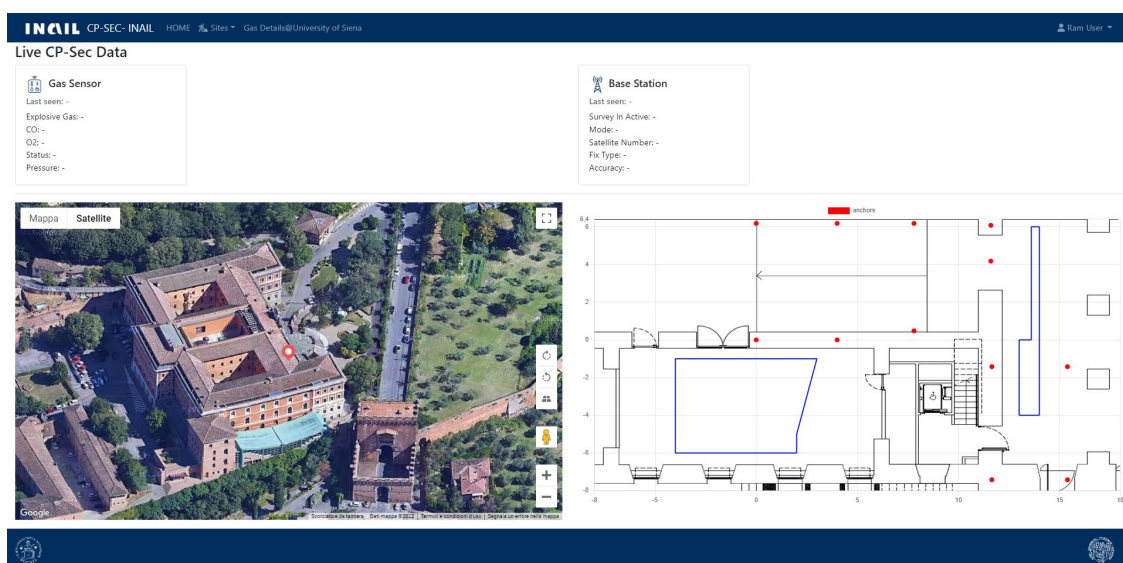


Figura 6.2-1 Homepage della *dashboard* di visualizzazione dati di CP-SEC

È inoltre disponibile una pagina di dettaglio relativa ai sensori di gas, dove i valori registrati sono mostrati sotto forma di grafici, che si aggiornano quindi in tempo reale (Figura 6.2-2).



Figura 6.2-2 Pagina di dettaglio dei valori di gas nella *dashboard* di visualizzazione dati di CP-SEC

6.3 Integrazione di sistemi di allarme con l'unità di supervisione di campo

La gestione e l'integrazione di allarmi nell'unità di supervisione di campo, coinvolge entrambi i partner.

Per quel che riguarda la parte di localizzazione, il sistema attiva una segnalazione visiva evidenziando in colore rosso il box del sensore di localizzazione per cui è stato visualizzato un valore anomalo, in particolare se viene rilevato l'accesso ad una delle aree non consentite o non accessibili dagli operatori/mezzi monitorati. Le zone di pericolo dovranno essere memorizzate come set up iniziale, e visualizzate sulle mappe di riferimento *indoor e outdoor* attraverso la *dashboard* Web.

6.4 Verifica sperimentale (TRL5)

Questa attività ha avuto come scopo l'installazione dei sistemi prototipali sviluppati (sistemi sensoriali ed unità di supervisione) in scenari operativi scelti ad hoc al fine di valutarne le prestazioni. La prima verifica sperimentale è stata effettuata nella sede del Centro Ricerche Inail di Monte Porzio Catone, svoltasi nel periodo 20 - 21 aprile 2022. Durante l'incontro sono state analizzate le aree che era possibile utilizzare per i test, e le attività di installazione e configurazione dell'infrastruttura necessari per la campagna di acquisizione.

Come primo passo è stato installato il Gateway LPS8 LoRaWAN all'interno dell'edificio dell'Inail garantendo una copertura sufficiente all'area presidiata. Per semplicità, il GW è stato collegato direttamente a un PC locale utilizzando un cavo di rete su cui era in esecuzione ChirpStack LoRaWAN Server [Chi-022]. Tuttavia, il gateway può essere anche connesso direttamente alla rete inter-

net per inviare i pacchetti ad un *server* LoRaWAN remoto. Per questa particolare dimostrazione, per motivi di semplicità, abbiamo optato per la soluzione di un *server* locale ma, anche in caso di *server* remoto, il sistema rimane inalterato. I pacchetti ricevuti dal gateway installato vengono inoltrati al *server* di rete ChirpStack e, infine, al *server* dell'applicazione ChirpStack.

In Figura 6.4-1 è mostrata una foto del gateway e del PC nel quale gira il *server* ChirpStack durante la dimostrazione.

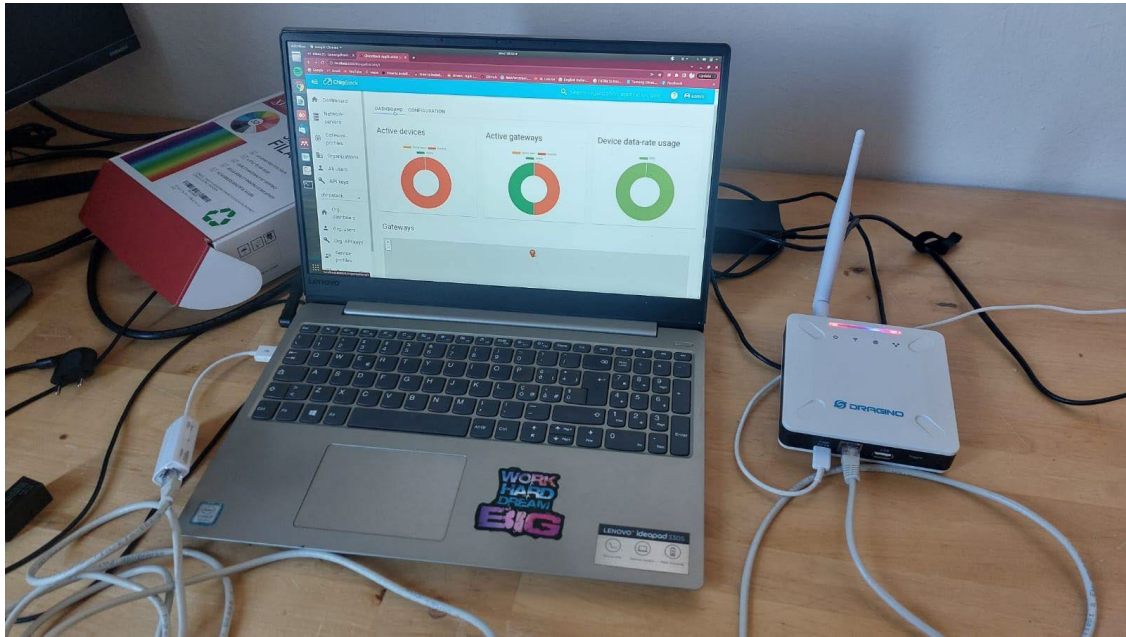


Figura 6.4-1 Gateway LoRaWAN e PC con il *software* ChirpStack utilizzati durante la dimostrazione

Il *server* ChirpStack LoRaWAN è un *software* open source in grado di gestire i pacchetti in uplink provenienti dai sensori attraverso il GW e protocollo LoRaWAN. I pacchetti ricevuti sul *server* ChirpStack vengono pre-elaborati da un back-end basato su applicativo NodeRed, e trasformati in un formato appropriato per poi essere inviati attraverso una API HTTP al *server* remoto (*server* CP-SEC) che memorizza e visualizza i dati per l'utente finale.

Tutte le informazioni relative ai dati e ai parametri di trasmissione come frequenza, spreading factor LoRa, contatore di frame e numero di porta, sono contenuti in un oggetto JSON contenente le informazioni di uplink. Tali informazioni vengono analizzate dal back-end per formare un nuovo payload JSON che viene inviato tramite l'API HTTP al *server* CP-SEC.

Di seguito è mostrato una schermata della *dashboard* del *server* di rete ChirpStack che visualizza i pacchetti LoRaWAN ricevuti durante il test.

Il nodo sensore trasmette i dati del sensore ogni minuto verso il *server*. In particolare, il messaggio è costituito da cinque campi dati inerenti le misure dei sensori, insieme a un *flag* di urgenza (un numero 0 e 1 che indicano rispettivamente “TUTTO OK” e “URGENZA”). La *dashboard* visualizza i dati in tempo reale rappresentando in un grafico tutti i valori dei sensori registrati. In Figura 5.2-2 viene riportato una schermata della *dashboard*.

Gli eventi di emergenza possono verificarsi a causa di uno qualsiasi dei seguenti eventi o di una combinazione dei tre;

- Concentrazione oltre il LEL di gas esplosivo;
- Alta concentrazione di monossido di carbonio;
- basso livello di ossigeno.

Questi eventi sono identificati come eventi potenzialmente pericolosi ed il pacchetto corrispondente è contrassegnato come “Pacchetto Urgente”. In generale, i test sono stati effettuati mediante la trasmissione di seguenti due tipi di pacchetti;

- Pacchetti regolari: questi pacchetti vengono inviati ogni minuto a scopo di monitoraggio, tuttavia il loro intervallo può essere settato in base ai requisiti del sistema.
- Pacchetti urgenti: questi pacchetti vengono generati a seguito di eventuali malfunzionamenti o eventi pericolosi sul campo e devono essere inviati immediatamente in modo da poter intraprendere in tempo le opportune contromisure.

Inoltre, un allarme acustico è immediatamente attivato localmente in caso di rilevazione di situazione potenzialmente pericolosa, contestualmente all’invio di un pacchetto di tipo urgente.

La Figura 6.4-4 mostra la schermata delle informazioni relative ai dati raccolti dal nodo sensore. In particolare, il campo “Status” mostra le informazioni di avviso a seconda del tipo di pacchetto trasmesso.

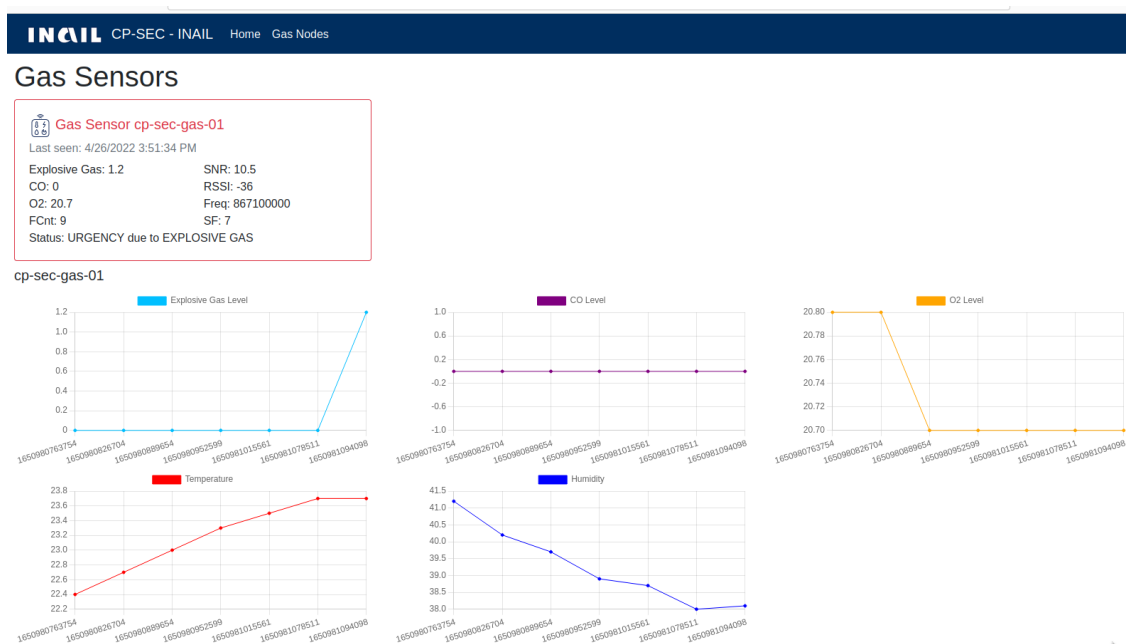


Figura 6.4-4 Visualizzazione della *dashboard* in caso di rilevamento di gas esplosivi

Per quel che riguarda le attività di localizzazione, il prototipo del nodo IoT target integrato, comprendente i sensori da utilizzare sia in ambiente *indoor* che *outdoor*, è stato integrato all'interno di un gilet catarifrangente standard, fissando le antenne ed i cavi in modo da non essere visibili e non interferire eccessivamente con i movimenti di chi lo indossa, come mostrato in Figura 6.4-5 e Figura 6.4-6.



Figura 6.4-5 Setup hardware del *rover* durante la campagna di acquisizione dati presso la sede Inail di Monte Porzio



Figura 6.4-6 Setup hardware della *base station* durante la campagna di acquisizione dati presso la sede Inail di Monte Porzio

Il modulo *base station* è stato installato in posizione sopraelevata (circa due piani) con una visione di 270 gradi rispetto al cortile esterno prescelto per la prova, ed è stata preliminarmente configurata in modo da eseguire la procedura di survey-in per ottenere la propria posizione, fino ad una precisione di 1 metro.

Per quel che riguarda lo scenario *indoor*, si è scelto di utilizzare il corridoio adiacente al cortile, la cui planimetria è mostrata in Figura 6.4-7 in cui sono state installate 10 ancore UWB, segnalate con i quadrati blu. Le ancore sono state alimentate tramite batteria ricaricabile, in quanto sul posto non c'era la possibilità di alimentazione tramite rete elettrica. Il posizionamento a griglia utilizzato è mostrato nella *dashboard* Web sotto forma di grafico cartesiano, come mostrato in Figura 6.4-8

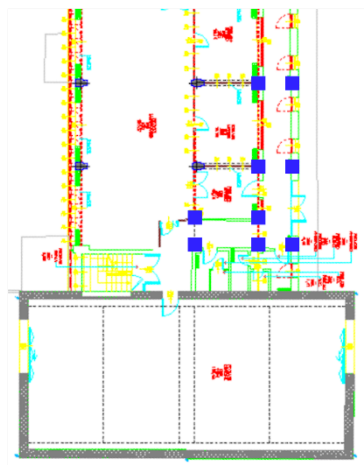


Figura 6.4-7 Visualizzazione in planimetria delle ancore UWB nell'area *indoor* selezionata

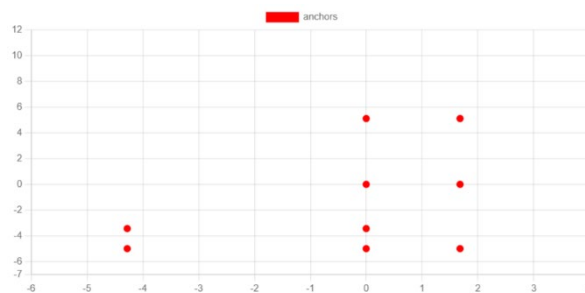
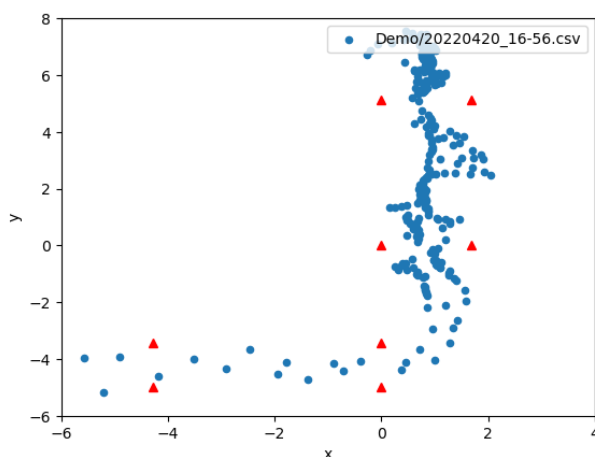


Figura 6.4-8 Visualizzazione del posizionamento delle ancore UWB sotto forma di grafico cartesiano

La prova ha riguardato un percorso misto *indoor-outdoor* che comprende anche l'operazione di salita e discesa da una struttura in carpenteria metallica collocata all'aperto, ma dotata di una copertura. Durante il percorso i dati di localizzazione *indoor* e *outdoor* sono stati inviati al *server* remoto con una frequenza di un dato al secondo, in modo indipendente e continuo.

In Figura 6.4-9 è visualizzato il percorso rilevato dal solo sistema *outdoor*, mentre in Figura 6.4-10 è visualizzato il percorso rilevato dal solo sistema *indoor*. I dati mostrati sono relativi ad alcuni test che si sono svolti nel pomeriggio del 20 aprile.

Figura 6.4-9 Posizioni rilevate dai sistemi di localizzazione *outdoor*Figura 6.4-10 Posizioni rilevate dai sistemi di localizzazione *indoor*

L'analisi dei risultati dei test effettuati presso la sede Inail di Monte Porzio ha confermato il fatto che il sistema di localizzazione richiede una precisa analisi degli ambienti *indoor e outdoor* da monitorare, che può richiedere anche diversi giorni, per la taratura e il posizionamento efficace delle componenti dell'infrastruttura composta dal modulo *base station* e dalle ancore UWB.

Durante i test per la parte *indoor* si è scelto di inserire un numero maggiore di ancore, con una distanza tra di loro inferiore, rispetto alle campagne di acquisizione svolte nella sede di Parma, in quanto non c'è stato il tempo sufficiente per indagare le eventuali anomalie della zona monitorata (come ad esempio fenomeni di rifrazioni con superfici diverse).

I test sulla struttura metallica messa a disposizione da Inail hanno permesso di fare alcune considerazioni preliminari anche sulla rilevazione dell'altitudine (posizionamento 3d), verificando che i valori di altitudine provenienti dal solo sistema satellitare non sono del tutto affidabili, soprattutto in presenza di aree coperte che possono limitare la visibilità dei satelliti.

Nelle ultime fasi del progetto, a valle della sperimentazione precedentemente descritta sono stati effettuati ulteriori test sul nodo sensore e sono state apportate alcune migliorie all'involucro. In primo luogo, il sistema composto dalla parte elettronica e dai sensori di gas è stato mantenuto attivo in maniera continuativa per circa 10 giorni per valutarne eventuali problemi legati alla stabilità

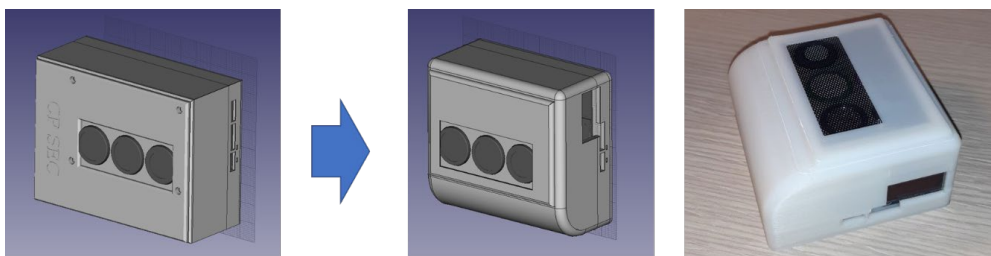
della misura dei sensori o ad altre variabili non controllate nella fase di progetto. In Figura 6.4-11 sono riportati gli andamenti di alcuni parametri misurati dal sistema (CO, Ossigeno e Temperatura) e periodicamente trasmessi attraverso il canale radio LoRa ad un *server* di test.



Figura 6.4-11 Dati di alcuni sensori durante il test di lunga durata

Dalla prova non sono emerse criticità e nel periodo di test, in particolare i sensori di gas sono stati ricalibrati a fine periodo con miscele certificate osservando variazioni dei coefficienti di calibratura entro le tolleranze indicate dal produttore del sensore.

Per quanto riguarda l'involucro del nodo sensore, si è provveduto ad una riprogettazione della sua forma cercando di ottimizzare gli ingombri e rendere il sistema più adatto ad essere indossato da un operatore. In Figura 6.4-12 è illustrata la riduzione degli ingombri ottenuta con la riprogettazione del contenitore plastico stampato in 3D. In particolare, sono stati eliminati il più possibile gli spazi vuoti adattando l'involucro alla batteria e alle schede elettroniche.



Prima versione

Attuale revisione

Figura 6.4-12 Revisione dell'involucro del nodo sensore

Le attività successive alla prima sessione di valutazione sperimentale hanno inoltre riguardato la prosecuzione dello sviluppo della *dashboard web* per la visualizzazione dei dati raccolti dai dispositivi sensoriali di rilevamento GPL e di localizzazione, e della struttura del database per la gestione organica delle informazioni e la loro storicizzazione.

7. Integrazione dei Cyber Physical Systems nei sistemi di gestione della sicurezza

Negli stabilimenti soggetti “Seveso”, il sistema di gestione per la sicurezza (SGS), essendo previsto dalla Direttiva Europea, da oltre venti anni è il pilastro della sicurezza; negli altri contesti è comunque fortemente incoraggiato attraverso sistemi di *soft-law*, ovvero norme prive di efficacia vincolante diretta. In particolare, Inail prevede sconti sui premi assicurativi a chi adotta il sistema di gestione, nonché contributi alle piccole imprese che intendono implementare il sistema di gestione per la sicurezza. Per essere precisi, nell’ambito Seveso si parla di “sistema di gestione per la prevenzione degli incidenti rilevanti”, mentre nell’ambito occupazionale si parla di “sistema di gestione per la sicurezza e la salute del lavoro”. Se si fa riferimento agli standard applicabili in Italia, per la sicurezza del lavoro si fa riferimento allo standard UNI ISO 45001:2018, mentre per la prevenzione degli incidenti rilevanti si fa riferimento allo standard UNI 10617:2019, la cui adozione è incentivata dalla D.Lgs 105/2015. Entrambe le normative fanno riferimento alla norma UNI ISO 31000 sul *risk management*, che è la madre di tutti i sistemi di gestione del rischio, indipendentemente dal campo di applicazione. Questo è importante, perché UNI ISO 45001 e UNI 10617 sono perfettamente integrabili.

Sotto l’ombrello SGS ci sono tutte le procedure e le istruzioni operative, che a loro volta sono alla base di molti CPS. I sensori distribuiti capillarmente in tutto il sito industriale e indossati dai lavoratori offrono una grande opportunità per migliorare e rafforzare la gestione della sicurezza. D’altra parte, sarebbe riduttivo ottenere una grande quantità di dati dal CPS senza sfruttarli nel sistema di gestione. CPS sono davvero una grande opportunità per migliorare drasticamente le prestazioni SGS. Il sistema di gestione deve includere i dati forniti dalla moltitudine di sensori distribuiti e indossati.

Per essere efficace, lo SGS dovrebbe essere in grado di adattarsi rapidamente alle nuove opportunità nel contesto. Dovrebbero essere introdotti elementi di flessibilità e dinamismo per trarre vantaggio dall’enorme quantità di dati forniti dai CPS. In un recente articolo [ANS-022] è stato proposto un nuovo approccio, per implementare il SGS, rimanendo nella struttura standard e sfruttando il potenziale delle tecnologie abilitanti. Il documento individua i livelli del sistema di gestione della sicurezza dove è possibile disporre di procedure e istruzioni flessibili, adeguate a sfruttare le potenzialità dei nuovi CPS. In particolare, una tempestiva comunicazione in aree congestionate e la rilevazione di fughe di gas forniscono dati e informazioni fondamentali per l’emergenza, che corrisponde al punto 8.2 del UNI ISO 45001 e del UNI 10617, Emergenza e Preparazione e Risposta. Gli eventi segnalati sono anche classificabili come anomalie e vanno anche utilizzati per acquisire elementi conoscitivi essenziale per il miglioramento; punto 10.2 incidenti, quasi-incidenti, non conformità e azioni correttive. Questo punto, presente sia in UNI ISO 45001 che in UNI 10617 risulta sempre difficile da realizzare e grazie ai CPS può essere facilmente automatizzato.

I CPS sono davvero una grande opportunità per migliorare decisamente la sicurezza sul lavoro. A tale scopo il sistema di gestione dovrebbe includere i dati forniti dalla moltitudine di sensori distribuiti e indossati, tenendo conto anche delle esigenze di privacy e sicurezza informatica [BRA-022].

L'esistenza di un moderno sistema di gestione, possibilmente UNI ISO 45001 o UNI 10617, è un prerequisito indispensabile per l'adozione dei CPS. È importante che i dati forniti dai CPS entrino nel sistema di gestione della sicurezza. Se questi criteri verranno applicati, i CPS in un prossimo futuro saranno decisivi in molti casi pratici.

8. Conclusioni

Le attività di sperimentazione legate al progetto CP-SEC ed i risultati ottenuti hanno posto le basi per la definizione e l'implementazione di un sistema di monitoraggio integrabile con SGS e con funzionalità innovative grazie all'integrazione delle tecnologie IoT e di CPS. Il sistema di monitoraggio descritto, infatti, permette di mantenere lo storico dei dati sia per quanto riguarda la localizzazione, sia per quanto riguarda l'andamento dei valori legati al rilevamento di gas. È quindi possibile l'integrazione (ad esempio tramite lo sviluppo di connettori e l'interrogazione di API HTTP) con applicativi diversi, già a disposizione delle aziende.

L'industrializzazione di tale sistema potrebbe quindi portare alla definizione di veri e propri Dispositivi di Protezione Individuale (DPI), così come descritto nel recente rapporto tecnico, UNI/TR 11858:2022, che descrive le caratteristiche delle tecnologie IoT applicate ai DPI, la loro gestione e l'interazione che esse hanno con il portatore e l'ambiente di lavoro. In particolare, definisce l'applicazione di tali tecnologie come: "sistemi composti da un'applicazione integrata nel DPI, da un'interfaccia che acquisisce le informazioni dal DPI e da un gestionale che le elabora", in modo del tutto coerente con l'architettura descritta per il progetto CP-SEC.

Nel rapporto, viene infine evidenziato come l'uso di nuove tecnologie impatta sulla gestione e sull'utilizzo dei DPI, rappresentando un'evoluzione dei DPI stessi: oltre ad offrire la protezione nei confronti del rischio residuo evolvono verso un sistema utilizzabile a fini di prevenzione e rilevazione pericoli. Nel punto 7.2 del rapporto tecnico, sono presentati alcuni esempi di funzionalità, fornite dai dispositivi IoT, che possono essere messe a disposizione dell'azienda in vari ambiti, tra cui il controllo degli accessi (punto 7.2.3) nel caso sia necessario rilevare la presenza di lavoratori in una determinata area per gestire potenziali rischi da interferenza o situazioni di emergenza. Al punto 7.3, esempi di funzionalità lato portatore tra le quali quelle utilizzabili a vantaggio e sostegno del suo livello di sicurezza; (punto 7.3.2) come la segnalazione di pericoli imminenti in caso di presenza di gas tossici o incendi.

Riferimenti bibliografici

[Che-017] Chen, B., Wan, J., L. Shu, Li, P., Mukherjee, M., Yin, B., 2017, “*Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges.*” IEEE Access (IEEE), pp. 6505-6519

[BOT-2016] Botti, L., Bragatto, P.A., Duraccio, V., Gnoni, M.G., Mora, C. *Adopting IOT technologies to control risks in confined space: A multi-criteria decision tool* (2016) Chemical Engineering Transactions, 53, pp. 127-132.

[Acc-022] Accuware, 2022, <https://www.accuware.com>

[Ubi-022] Ubiquicom, 2022, <https://www.ubiquicom.com>

[Ela-013] *Elaborato tecnico Rischio di Incidenti Rilevante* (Comune di Vergiate, Varese), 2013, http://www3.comune.vergiate.va.it/PGT_Adozione/E.R.I.R/ERIR%20Elaborato%20Tecnico%20Rischio%20di%20Incidenti%20Rilevanti.pdf

[Lor-022] Protocol Specification, 2022, “*LoRaWAN Specification v1. 0.2*”, LoRa Alliance https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-0-2/

[Sch-016] Schlien, J., and Raddino, D., 2016, “*Narrowband internet of things whitepaper.*” White Paper, Rohde&Schwarz, pp. 1-42

[Dav-022] Davoli, L., Belli, L., Denaro, F., Tamang, D., Abrardo, A., & Ferrari, G., 2022, “*On Safety Enhancement in IIoT Scenarios through Heterogeneous Localization Techniques*”, Chemical Engineering Transactions, pp. 259-264.

[Dec-022] *DecaWave DWM1001*, 2022, <https://www.qorvo.com/products/p/DWM1001-DEV>

[Bos-022] *Bosch BN055*, 2022, <https://www.bosch-sensortec.com/products/smart-sensors/bno055/>

[Lee-009] Leens, F., 2009, “*An introduction to I 2 C and SPI protocols*”, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, pp. 8-13

[Wub-006] Wübbena, G., Martin S., and Andreas B., 2006, “*Real-Time GNSS Data Transmission Standard RTCM 3.0*”, Geo++® GmbH IGS Workshop, Darmstadt, Germany

[NgK-018] Ng, K. M., Johari, J., Abdullah, S. A. C., Ahmad, A., & Laja, B. N., 2018, “*Performance evaluation of the RTK-GNSS navigating under different landscape*”, 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE, pp. 1424-1428

[Bat-008] Battle, R., and Benson, E., 2008, “*Bridging the semantic Web and Web 2.0 with representational state transfer (REST)*.” Journal of Web Semantics 6.1, pp. 61-69

[Apa-022] Apache HTTP Server Project, 2022, <https://httpd.apache.org/>

[Cod-022] *CodeIgniter Framework*, 2022, <https://codeigniter.com/>

[Lef-001] Leff, A., and Rayfield, J. T., 2001, “*Web-application development using the model/view/controller design pattern*” Proceedings fifth IEEE international enterprise distributed object computing conference, IEEE

[Chi-022] *ChirpStack* open-source LoRaWAN Network Server, 2022, <https://www.chirpstack.io/>

[ANS-022] Ansaldi, S.M., Bragatto, P. *Widespread Sensors and Artificial Intelligence for a Novel Safety Management System at the Seveso sites* (2022) *Chemical Engineering Transactions*, 90, pp. 577-582.

[GBMS-020] Gnoni, M.G., Bragatto, P.A., Milazzo, M.F., Setola, R. *Integrating IoT technologies for an “intelligent” safety management in the process industry* (2020) *Procedia Manufacturing*, 42, pp. 511-515.

Legislazione

D.lgs. 26 giugno 2015, n. 105

Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose. (15G00121) (GU Serie Generale n.161 del 14-07-2015 - Suppl. Ordinario n. 38)

D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81

Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. (GU Serie Generale n.101 del 30-04-2008 - Suppl. Ordinario n. 108)

Norme tecniche

UNI ISO 45001:2018 Sistemi di gestione per la salute e sicurezza sul lavoro - Requisiti e guida per l'uso.

UNI 10617:2019 Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Requisiti essenziali

UNI 10616:2022 Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Linee guida per l'applicazione della UNI 10617

UNI ISO 31000:2018 Gestione del rischio - Linee guida

UNI/TR 11858:2022 Tecnologie IoT nell'impiego dei DPI - Indicazioni relative all'integrazione di sistemi elettronici nella gestione e nell'utilizzo dei dispositivi di protezione individuali

I Quaderni di ricerca

- 1 - G. Ciriello, M. De Felice, R. Mosca, M. Veltroni, *Infortuni sul lavoro. Un modello di lettura (della numerosità) su "open data" dell'Inail*
- 2 - L. Cortis, F. M. Fabiani, C. Ratti, L. Rossi, D. G. Svampa, C. Vitale, *Analisi e valutazione del comportamento dell'assorbitore di energia nei sistemi di arresto caduta con differenti masse di prova*
- 3 - P. Rossi, *Danno biologico: monitoraggio, criticità e prospettive d'interesse medico-legale a dieci anni dall'introduzione della nuova disciplina*
- 4 - M. De Felice, A. Goggiamani, R. Mosca, M. Veltroni, *Malattie professionali. Un modello di lettura (della numerosità) su "open data" dell'Inail*
- 5 - L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa, *Nuovi strumenti per la valutazione dello scivolamento e ribaltamento delle scale portatili*
- 6 - L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa, *Determinazione della resistenza caratteristica dei dispositivi di collegamento montante-traverso nei ponteggi metallici fissi di facciata*
- 7 - S. Carruba, R. Grimaldi, M. Sparro, S. Tomasini, *Vendor Rating: il modello di valutazione delle forniture IT dell'Inail*
- 8 - P. Agnello, S. M. Ansaldi, *Una proposta di ontologia per gli Open Data Inail sugli infortuni: dalla numerosità dei dati alla gestione della conoscenza*
- 9 - A. Alvino, A. Antonini, C. Delle Site, A. Di Loreto, F. Giacobbe, D. Lega, E. Pichini, M.A. Pierdominici, L. Ricciardi, A. Tonti, *Analisi delle cause di rottura di materiali metallici: esempi di Applicazione*
- 10 - L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa, *Light workers e criticità dell'assorbitore di energia nei sistemi di arresto caduta*
- 11 - S. Carruba, R. Grimaldi, M. Sparro, S. Tomasini, *Vendor Rating: la valutazione delle forniture IT dell'Inail per il 2015*
- 12 - L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa, *Metodologia per prove di rigidità e resistenza per i dispositivi di collegamento montante-traverso nei ponteggi metallici fissi di facciata*
- 13 - R. Giovinazzo, E. Guerrera, M. Mameli, D. Sarto, M. Veltroni, *Analisi della contaminazione microbiologica degli ambienti di lavoro. Valutazione della qualità del dato analitico nel conteggio microbico su piastra e nelle prestazioni dell'operatore*
- 14 - P. Agnello, F. Bracco, C. Brunel, M. Masini, T. F. Piccinno, A. Sedaoui, D. Tazi, *Promuovere la sicurezza nelle organizzazioni attraverso manager resilienti*

- 15 - L. Rossi, *Esecuzione in sicurezza dei lavori in copertura. Misure di prevenzione e protezione*
- 16 - F. Antonello, P. Bragatto, F. Di Maio, S. M. Hoseyni, E. Zio, *Stima adattiva del rischio di rottura di attrezzature in pressione, sulla base dei dati di monitoraggio*
- 17 - J. Cecca, N. L'Episcopo, L. Mainero Rocca, *Nuove tecniche analitiche al servizio della sicurezza dei lavoratori: sviluppo di un metodo di analisi diretta di fungicidi e insetticidi sulla superficie delle foglie*
- 18 - A. Di Francesco, P. Iacono, A. Nebbioso, A. Pirone, G. Saputi, C. Simeoni, M.R. Vallerotonda, *Settore Seveso: contesto normativo e caratterizzazione statistica degli infortuni*
- 19 - F. M. Fabiani, L. Rossi, *Criticità delle reti di sicurezza di piccole dimensioni*
- 20 - Bragatto, C. Mennuti, M. F. Milazzo, E. Proverbio *Tecniche avanzate per la gestione dei serbatoi di stoccaggio atmosferico*
- 21 - E. Badellino, T. P. Baccolo, M. R. Marchetti, A. Papale, I. Rossi, E. Rotoli, S. Signorini *Il progetto Inail: La prevenzione alimentare al lavoro in ottica bio-psico-sociale - I risultati della ricerca-intervento*

