



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale

Dottorato di ricerca in Infrastrutture e Trasporti
XXXII Ciclo

Tesi di Dottorato:

**L'incremento della sicurezza nelle gallerie stradali:
sviluppo di un sistema di navigazione indoor come supporto
all'esodo pedonale**

Dottorando:
Ing. Ciro Fusco

Tutor:
Prof.ssa Paola Di Mascio

Relatore:
Prof.ssa Mara Lombardi

Anno Accademico 2018-2019

Ai miei genitori, che mi guidano da lassù



Framura (SP) - ottobre 2018

*Un particolare ringraziamento a
Paola, Mara, Massimo, Giuseppe, Giuliano, Nicolò, Alessio, Nina, Enrico, Rino e
Andrea Da Passano, Sindaco di Framura (SP)*

Abstract

Le gallerie stradali, soprattutto quelle di significativa lunghezza, possono essere considerate ambienti a rischio d'incidente rilevante, in particolare per la gravità delle conseguenze, principalmente quando l'infrastruttura risulta interessata da un incendio. Per ridurre tali rischi le gallerie devono sottostare a particolari prescrizioni legislative e normative che interessano sia la fase di realizzazione che quella di esercizio, così da consentire il raggiungimento di un livello di sicurezza ritenuto accettabile. La sicurezza in questi ambienti dipende da numerosi fattori e una visione olistica risulta oggi indispensabile per riuscire ad individuare, comprendere e ridurre, in modo sostenibile, le criticità ancora presenti. Un fattore che rappresenta un punto debole della sicurezza in galleria è certamente quello relativo alle difficoltà di esodo in condizioni di emergenza, come accade appunto in caso d'incendio.

Il mondo accademico e di conseguenza l'ambito normativo, da sempre sensibili a questi aspetti, hanno indicato nel tempo notevoli miglioramenti alle dotazioni impiantistiche di galleria, le quali oggi operano sia sul fronte della prevenzione che della riduzione del danno. In merito all'esodo pedonale i sistemi di sicurezza elettrici ed elettronici risultano d'indispensabile supporto all'autosoccorso dell'utente impegnato a lasciare l'infrastruttura. A tal riguardo risultano particolarmente rilevanti l'illuminazione e la segnalazione delle vie di esodo, ma nonostante i progressi tecnologici questi sistemi presentano ancora significative criticità, soprattutto quando occorre orientarsi in condizioni di scarsa visibilità per la presenza di densi fumi. In queste situazioni infatti l'esodo è compromesso sia da aspetti oggettivi legati alle difficoltà ambientali sia da aspetti connessi con il comportamento umano in condizioni di ansia o addirittura di panico.

Questo studio, dopo un doveroso inquadramento normativo e tecnico, tratta l'individuazione e lo sviluppo, anche attraverso numerose prove sperimentali in galleria, di un sistema di navigazione indoor, fruibile su smartphone, dedicato al supporto dell'utenza durante l'esodo pedonale, al fine di contrastare le difficili condizioni ambientali e l'imprevedibilità del comportamento umano.

L'obiettivo principale del sistema è quello di fornire all'utente informazioni dinamiche sul percorso più sicuro da seguire per abbandonare a piedi la galleria. Il sistema è basato sull'utilizzo di particolari dispositivi elettronici denominati Beacon BLE

(Bluetooth Low Energy), i quali trovano oggi applicazione in numerosi campi, tra cui anche quelli, in via di sviluppo, sul posizionamento e sulla navigazione in ambienti chiusi. Si evidenzia che allo stato attuale non si registrano applicazioni di indoor positioning finalizzate a fornire funzioni di sicurezza nelle gallerie stradali, a tal proposito il sistema sviluppato in questo progetto di ricerca è stato oggetto di deposito di una domanda di brevetto da parte di Sapienza Università di Roma.

Si precisa inoltre che lo scopo di questa ricerca non è stato quello di studiare nuove tecniche di localizzazione indoor, bensì di sfruttare lo stato dell'arte per individuare e sviluppare un sistema con caratteristiche di fidatezza e sostenibilità economica tali da consentire specifiche applicazioni di sicurezza in un ambiente così particolare come quello delle gallerie stradali.

Si ritiene che il sistema presentato in questo studio, oltre a fornire un contributo alla riduzione del rischio connesso all'esodo pedonale, possa essere sfruttato anche per altre applicazioni di sicurezza in galleria, ad esempio nel supporto alle squadre di soccorso, nella gestione della manutenzione e nel supporto alla guida.

Sommario

1.0	CAPITOLO I - La sicurezza delle gallerie stradali	8
1.1	Introduzione alla sicurezza in galleria	8
1.1.1	L'importanza dei sistemi elettrici ed elettronici	10
1.2	Inquadramento legislativo e normativo	13
1.2.1	Il D. Lgs. 35/2011	13
1.2.2	Il D. Lgs. 264/2006.....	17
1.2.3	Linee guida ANAS 2009.....	21
1.2.4	La norma CEI 64-20	28
2.0	CAPITOLO II - Aspetti generali di affidabilità e valutazione del rischio.....	32
2.1	Concetti di base e definizioni.....	32
2.2	Progettare con approccio RAMS	34
2.3	Il guasto di un componente e la sua affidabilità	35
2.4	Fail safe.....	41
2.5	Affidabilità dei sistemi.....	42
2.5.1	Ottimizzazione dell'affidabilità	45
2.5.2	SIL - Safety Integrity Level (IEC 61508:2010).....	46
2.6	Valutazione del rischio	48
2.6.1	Metodi qualitativi.....	50
2.6.2	Approccio quantitativo	52
3.0	CAPITOLO III - Il comportamento umano in condizioni di emergenza	56
3.1	Le reazioni umane e l'esodo di emergenza.....	56
3.2	Simulatori e modelli del movimento umano.....	60
3.3	L'importanza dei sistemi tecnologici nel supporto all'autosoccorso.....	64
4.0	CAPITOLO IV - Localizzazione e navigazione in ambienti chiusi.....	66
4.1	Introduzione all'indoor positioning	66
4.2	Principali tecniche di ranging	68
4.2.1	Time of Arrival (ToA)	69
4.2.2	Time of Flight (ToF).....	70
4.2.3	Angle of Arrival (AoA) e Angle of Departure (AoD)	71
4.2.4	Receive Signal Strength Indicator (RSSI)	72
4.3	Tecniche di positioning con l'utilizzo dell'indicatore RSSI.....	78
4.3.1	Cell of Origin (CoO).....	78
4.3.2	Min-Max	79
4.3.3	Trilaterazione	80

4.3.4	Multilaterazione.....	83
4.3.5	Fingerprint	83
4.3.6	Altri algoritmi e filtri di segnale	85
4.4	Introduzione al Bluetooth Low Energy (BLE)	88
4.4.1	Dispositivi Beacon BLE	90
4.4.2	Beacon BLE nell'indoor positioning	99
4.5	La localizzazione nelle gallerie stradali: studi e applicazioni esistenti.....	101
4.5.1	Il Progetto SAVE ME.....	101
4.5.2	Il Sistema Waze	101
5.0	CAPITOLO V - Sistema di indoor positioning con Beacon BLE, ottimizzato per il supporto dell'esodo pedonale nelle gallerie stradali	103
5.1	Individuazione del sistema.....	103
5.1.1	I contatti con le aziende del settore, i Beacon e gli applicativi utilizzati.....	105
5.2	Test preliminari sul comportamento dei Beacon	113
5.2.1	In esterno, senza ostacoli	113
5.2.2	In comuni ambienti chiusi.....	128
5.3	Sperimentazione nella galleria stradale di Framura (SP).....	140
5.3.1	Preparazione	142
5.3.2	Test preliminari.....	145
5.3.3	Test di indoor positioning.....	160
5.3.4	Sintesi dei risultati e relative considerazioni	182
5.4	Il perfezionamento del sistema e lo sviluppo delle funzioni di supporto all'esodo.....	185
5.4.1	Posizione dei Beacon e limitazione della superficie di localizzazione	187
5.4.2	Aspetti di vulnerabilità e manutenibilità del sistema	191
5.4.3	Linearizzazione e orientamento della planimetria di navigazione.....	196
5.4.4	Funzionamento di base: livello di prestazione 0.....	200
5.4.5	Funzionamento in condizioni ordinarie: livello di prestazione I	203
5.4.6	Funzionamento in condizioni di emergenza: livello di prestazione II	207
5.4.7	Riepilogo delle prestazioni fornite dai diversi livelli di funzionamento.....	215
5.4.8	Stima dei costi di realizzazione al km	217
5.4.9	La fruizione su smartphone e l'interfaccia di navigazione	219
5.5	Individuazione di altre funzioni e applicazioni di sicurezza.....	221
5.5.1	Supporto alle squadre di soccorso e richiesta di aiuto da parte dell'utente	221
5.5.2	Supporto alla gestione della manutenzione.....	224
5.5.3	Supporto alla guida	225

5.5.4	Supporto ai sistemi di guida di macchine automatiche e dispositivi robotici	226
5.6	Approfondimenti sull'alimentazione e il controllo dei Beacon	226
5.6.1	Caratteristiche del cablaggio di alimentazione	230
5.6.2	Supercapacitori per l'alimentazione autonoma dei singoli dispositivi BLE.....	234
5.7	Conclusioni e sviluppi futuri.....	243
6.0	Bibliografia.....	245

1.0 CAPITOLO I - La sicurezza delle gallerie stradali

1.1 Introduzione alla sicurezza in galleria

Le gallerie stradali sono particolari ambienti confinati dove gli eventi incidentali possono facilmente evolvere in scenari che danno luogo a conseguenze di elevata gravità, in particolare in caso di incendio o di rilascio di sostanze tossiche; si ricordano ad esempio le tragedie verificatesi nel traforo del Monte Bianco (1999), nel tunnel del Tauri (1999) e in quello del San Gottardo (2001), dove persero la vita decine di persone. In galleria gli incidenti risultano statisticamente meno probabili di quelli che si verificano sulle strade a cielo aperto, ma purtroppo sono generalmente caratterizzati da conseguenze decisamente più gravi, che scatenano reazioni particolarmente accese da parte dell'opinione pubblica. Nell'ultimo ventennio questi aspetti hanno sensibilizzato sia il mondo accademico che le istituzioni, portando allo sviluppo di un quadro normativo europeo finalizzato ad aumentare la sicurezza delle nuove gallerie e di quelle esistenti.

Le gallerie stradali sono sistemi complessi, la cui progettazione, realizzazione e gestione devono necessariamente essere basate su un approccio integrato, in grado di agire efficacemente sulla prevenzione degli eventi critici e sulla mitigazione delle conseguenze. Tali aspetti assumono particolare rilevanza quando si è chiamati a trattare infrastrutture di significativa lunghezza, come d'altronde evidenziano le prescrizioni normative. Per la rete TERN (Trans European Road Network) le normative vigenti richiedono infatti approcci diversi per la progettazione della sicurezza in galleria, a seconda se queste infrastrutture sono superiori, oppure no, a 500 m di lunghezza. Infatti per le gallerie superiori a 500 m occorre seguire la Direttiva 2004/54/CE, mentre per la restante rete stradale è richiesto di applicare la Direttiva 2008/96/CE. Recentemente le commissioni tecniche PIARC (World Road Association), competenti per i settori TC 3.2 (Design and Operation of Safer Road Infrastructure) e TC 3.3 (Road tunnels operations), hanno individuato l'obiettivo di una gestione comune per gli aspetti di progettazione e verifica di sicurezza riferiti alle diverse Direttive. In generale l'obiettivo è finalizzato ad ottimizzare gli interventi per offrire maggiore sicurezza all'utenza e ai lavoratori delle infrastrutture stradali.

A tal proposito, in accordo anche con quanto pubblicato da Rossi, Lombardi e Di Mascio (2018) [C13], si ritiene opportuno muoversi verso un miglior coordinamento tra i diversi approcci, in modo da poter individuare preliminarmente le metodologie e gli indicatori di rischio più opportuni.

La figura 1.1, realizzata seguendo quanto riportato nel *Manuale delle Gallerie Stradali* del PIARC [F13], schematizza i principali aspetti che ruotano intorno alla sicurezza in galleria, aspetti che sono certamente da gestire attraverso un adeguato approccio olistico.

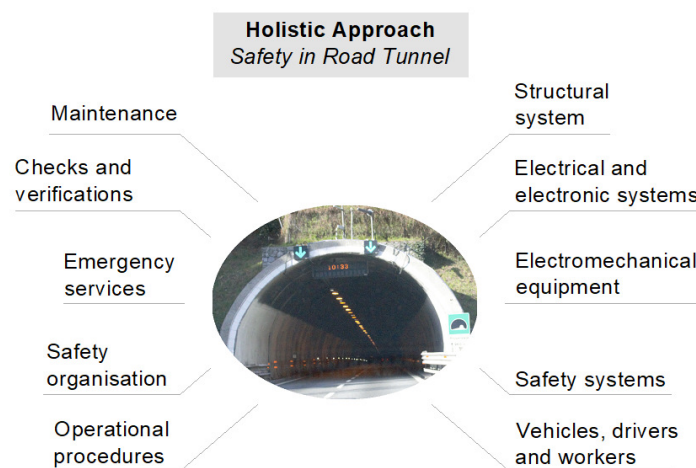


Figura 1.1: approccio olistico per la gestione della sicurezza nelle gallerie stradali

Un livello di sicurezza adeguato ed economicamente sostenibile può essere raggiunto solo attraverso un'interazione ottimizzata dei diversi aspetti che influenzano la sicurezza dell'infrastruttura, incluso i sistemi tecnologici e il comportamento degli utenti. Ed è proprio su questi due ultimi aspetti che ruota il presente progetto di ricerca, il quale si prefigge di portare un contributo alla sicurezza in galleria, attraverso la realizzazione di un sistema di indoor positioning (IPS), ottimizzato per l'infrastruttura stradale e finalizzato prevalentemente ad aumentare l'efficacia dell'autosoccorso degli utenti in condizioni di emergenza. Lo sviluppo del sistema, con le relative sperimentazioni in galleria, saranno affrontate nel capitolo V, dopo un doveroso inquadramento normativo e tecnico, nonché sullo stato dell'arte dei sistemi di indoor positioning.

1.1.1 L'importanza dei sistemi elettrici ed elettronici

Risulta ormai chiaro che la sicurezza e la sostenibilità economica di una galleria stradale necessitano di un approccio integrato da mettere in atto sin dalle prime fasi di progettazione. Oggi affrontare la progettazione di una galleria, concentrandosi solo sull'allineamento, sulla geologia e in generale sull'ingegneria civile, senza tenere in evidenza, sin da subito, l'integrazione di tutti i necessari sottosistemi e dotazioni tecnologiche, conduce certamente alla realizzazione di un'opera non ottimizzata. Così facendo, il rischio, le misure di mitigazione e i relativi costi possono facilmente non presentare quell'equilibrio che risulta indispensabile in ogni moderna opera ingegneristica, in particolare in quelle interessate da rischi significativi per le persone e l'ambiente. In letteratura si possono trovare alcune opere che forniscono un'aggiornata visione d'insieme sulla sicurezza nelle gallerie stradali, tra queste il testo *Sicurezza in Galleria* di Domenichini e Caputo (2016) [C2] si colloca tra quelli che hanno fornito interessanti spunti nelle fasi iniziali della presente ricerca.

Tra i sottosistemi tecnologici quelli relativi all'impiantistica elettrica ed elettronica risultano certamente indispensabili ai fini della sicurezza in galleria, in quanto prevalentemente preposti a ridurre gli incidenti e la loro gravità.

L'implementazione in galleria dei numerosi sistemi tecnologici oggi disponibili deve tener conto delle prescrizioni normative e di tutta una serie di aspetti legati alla valutazione e gestione del rischio. Per l'individuazione delle necessarie dotazioni occorre considerare anche una serie di caratteristiche specifiche di ogni infrastruttura, come ad esempio la lunghezza, l'uni o la bidirezionalità, i dati sull'intensità e sulla tipologia di traffico, le soluzioni da attuare per la gestione ottimale delle emergenze e naturalmente le opportune considerazioni se si tratta di una nuova galleria oppure dell'adeguamento di un'opera esistente.

L'energia per il funzionamento di questi sistemi è tra i primi punti da considerare; nelle grandi opere, nonostante i progressi in termini di efficienza energetica, si raggiungono facilmente diversi megawatt di potenza elettrica, pertanto molto spesso occorre rinforzare le reti di distribuzione esistenti, oppure considerare la possibilità di realizzare nuove reti. L'alimentazione naturalmente deve essere garantita in ogni condizione di galleria, pertanto per ottenere elevati livelli di disponibilità è necessario attuare diversi accorgimenti. Tra questi si evidenziano la ridondanza e l'interconnessione delle reti,

l'utilizzo di trasformatori MT-BT in parallelo, l'installazione di generatori elettrici locali e l'utilizzo di unità di emergenza UPS (Uninterruptible Power Supply), in particolare per garantire l'alimentazione dei circuiti di sicurezza, così come richiesto dalle normative¹.

All'interno di una moderna galleria stradale l'impiantistica ha raggiunto un tale livello di complessità da richiedere, sia nella fase di progettazione che di realizzazione, un approccio multidisciplinare tra professionisti di diversi ambiti, tra cui elettrici, elettronici e informatici.

Al fine di fornire un quadro dei principali sistemi elettrici ed elettronici presenti in una moderna infrastruttura di lunghezza superiore a 500 m, si riportano di seguito i circuiti tipici, secondo le indicazioni e le definizioni della norma CEI 64-20 [B9]:

Circuiti ordinari

Sono quelli atti a garantire il funzionamento dei seguenti impianti:

- illuminazione permanente;
- illuminazione di rinforzo;
- ventilazione per la diluizione, in condizioni di esercizio, delle emissioni dei veicoli (ventilazione sanitaria).

Circuiti di emergenza

In caso di mancanza dell'energia elettrica ordinaria deve intervenire, in un tempo non superiore a 15 s, un sistema di generazione locale (gruppo elettrogeno), al fine di garantire il funzionamento dei seguenti impianti.

- alimentazione del sistema di sicurezza (impianto che deve garantire l'alimentazione dei gruppi di continuità assoluta (UPS), i quali a loro volta garantiscono la continuità dell'alimentazione dei circuiti di sicurezza);
- illuminazione di riserva;
- ventilazione per la gestione degli affluenti dell'incendio;
- ventilazione delle vie di fuga;

¹ La norma CEI 64-20:2015 [B9] richiede espressamente, nelle gallerie di lunghezza superiore a 500 m, un'alimentazione secondaria per i circuiti di emergenza, come ad esempio quelli dell'illuminazione di esodo e dei sistemi semaforici.

- alimentazione elettropompe e ogni altra dotazione a servizio degli impianti antincendio.

Circuiti di sicurezza

Sono i circuiti destinati a garantire la continuità dell'alimentazione dei seguenti sistemi e impianti:

- sistemi di illuminazione e segnalazione vie di esodo;
- sistemi di videosorveglianza con rilevazione traffico e incidenti;
- sistemi di rivelazione incendi e sostanze pericolose (opacimetri, sensori di rilevazione inquinanti, sistemi di rilevazione lineare della temperatura, sensori di fiamma, sensori di CO, sensori di NO,)
- sistemi di mitigazione incendio;
- sistemi di comunicazione;
- stazioni di emergenza;
- impianti relativi alle aree di by-pass;
- segnaletica, sistemi semaforici e pannelli a messaggi variabili;
- sistemi impiantistici asserviti al drenaggio e alla raccolta dei liquidi infiammabili e inquinanti;
- sistemi di supervisione e controllo (SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition);

Se pur con diversi livelli di rilevanza, ognuno dei sistemi sopra elencati svolge funzioni atte a ridurre il rischio presente in galleria, pertanto risulta fondamentale progettare, realizzare e mantenere tale impiantistica tenendo sempre ben presente l'aspetto affidabilistico, in particolare per i circuiti e le apparecchiature dei sistemi di sicurezza.

Come vedremo anche le varie fasi dello sviluppo del sistema di localizzazione indoor, proposto in questo progetto di ricerca, sono state caratterizzate prevalentemente da un approccio basato sull'affidabilità di funzionamento.

1.2 Inquadramento legislativo e normativo

Questo secolo, sia per gli incidenti rilevanti avvenuti in galleria sia per l'intensa evoluzione delle discipline in materia di sicurezza e valutazione del rischio, ha visto nascere leggi e normative tecniche nell'ambito della sicurezza di queste infrastrutture stradali.

Il nostro paese è tra quelli al mondo con più gallerie, pertanto si trova in prima linea ad affrontare e gestire al meglio gli aspetti di sicurezza legati a queste infrastrutture. Le nazioni che hanno molte gallerie si sono dotate nel tempo di regolamenti e hanno sviluppato linee guida per la progettazione, realizzazione e gestione di queste importanti e strategiche opere di ingegneria. Diverse informazioni a tal riguardo sono reperibili sul sito ITA-AITES².

Come abbiamo precedentemente accennato, per le gallerie più lunghe di 500 m, i paesi appartenenti all'Unione europea sono soggetti alla Direttiva 2004/54/CE, che per completezza di trattazione vedremo brevemente insieme ad altri documenti normativi di interesse. Si ricorda inoltre che nel nostro paese la sicurezza delle gallerie stradali ha assunto ulteriore rilevanza a seguito dell'entrata in vigore del DPR 151/2011, con il quale le gallerie stradali, superiori a 500 m di lunghezza, sono state inserite nelle attività (attività n° 80, cat. A) soggette ai controlli di prevenzione incendi da parte del Comando provinciale dei Vigili del fuoco.

1.2.1 Il D. Lgs. 35/2011

L'attuazione della Direttiva 2008/96/CE sulla gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali è regolamentata in Italia dal D. Lgs. n. 35 del 15 marzo 2011.

Inizialmente il campo di applicazione del presente Decreto riguardava solo le strade facenti parte della rete stradale transeuropea (siano esse in fase di pianificazione, di progettazione, in costruzione o già aperte al traffico), mentre per le altre tipologie di strade i contenuti del Decreto costituivano solo norme di principio. A decorrere dal 1° gennaio 2016 il Decreto si applica anche alla rete di strade di interesse nazionale, individuata dal D. Lgs. 461/1999. Infine entro il 31 dicembre 2020 le regioni e le

² International Tunneling and Underground Space Association. <https://www.ita-aites.org> [F5]

province autonome dovranno applicare i principi del Decreto anche per le strade di loro competenza.

Il D. Lgs. 35/2011 detta disposizioni per l'attuazione di procedure volte alla valutazione di impatto sulla sicurezza stradale (VISS), ai controlli della sicurezza sui progetti, alle ispezioni di sicurezza sulle infrastrutture esistenti e alla classificazione della sicurezza della rete stradale. In particolare i criteri e le modalità per attuare i controlli, le ispezioni e la classificazione della rete stradale sono stabiliti dalle “linee guida per la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali” [A8], emanate il 2 maggio 2012 dal Ministero delle Infrastrutture e Trasporti.

I controlli sui progetti e le ispezioni sulle infrastrutture esistenti, definite “analisi di sicurezza stradale”, sono attività di tipo preventivo improntati ad individuare criticità che possono generare incidenti; tali attività devono essere svolte dai cosiddetti “esperti della sicurezza stradale”, figure professionali con determinati requisiti che devono essere iscritti nell'apposito elenco istituito presso il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.

Tra le diverse attività di sicurezza previste dal D. Lgs. 35/2011 i controlli e le ispezioni rappresentano sicuramente delle attività tecniche di importanza rilevante, ma è necessario che non siano svolte come fasi distaccate dell'intero processo di gestione della sicurezza. Queste attività, come raccomandato dalle linee guida, devono infatti far parte di un ciclo di azioni consequenziali e iterative finalizzate tutte a migliorare la sicurezza della rete stradale attraverso una sua gestione ottimizzata.

La seguente immagine, tratta dalle linee guida [A8], raffigura l'articolato ciclo delle attività coinvolte nella gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali, tra cui appunto quelle di controllo e ispezione sopra menzionate.



Figura 1.2: ciclo completo delle attività presenti nel processo di gestione delle infrastrutture stradali [A8]

Si ritiene che la fase delle ispezioni rappresenti un aspetto delicato e di primaria importanza nel ciclo delle attività di sicurezza; di seguito la figura che illustra il dettaglio di tale fase.

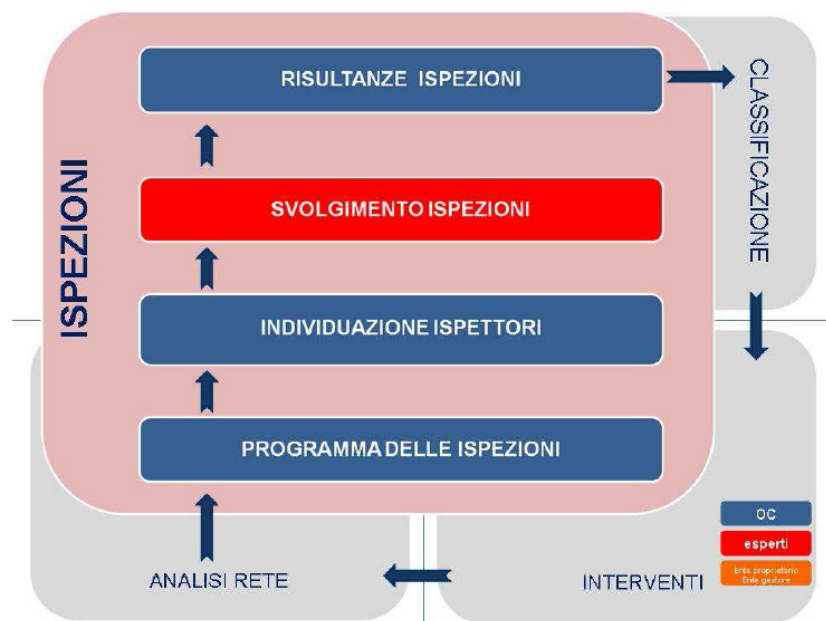


Figura 1.3: dettaglio della fase "Ispezioni" [A8]

L'ispettore, nelle risultanze delle ispezioni, deve includere il relativo rapporto finale, così articolato:

- **prescrizioni:** soluzioni a carenze gravi, relative al mancato rispetto di norme di progettazione e gestione, che devono essere adottate dall'Ente gestore su richiesta specifica dell'Organo Competente³;
- **raccomandazioni:** soluzioni per il miglioramento della sicurezza che richiedono però pianificazione e programmazione congiunta tra Organo Competente ed Ente gestore;
- **indicazioni:** suggerimenti facilmente applicabili dall'Ente gestore.

Le risultanze delle ispezioni e il relativo rapporto finale, pur dovendo sottostare a determinati indicatori, sono ottenuti fondamentalmente attraverso un approccio valutativo basato sul giudizio esperto dell'ispettore. Si ritiene che tale approccio, pur necessario, in quanto consente un'opportuna visione d'insieme, possa risultare critico per la nota soggettività del metodo, pertanto andrebbe integrato con valutazioni, anche semplificate, basate sull'Analisi di Rischio Quantitativa (QRA).

Occorre precisare che il D. Lgs. 35/2011 non si applica alle gallerie stradali che rientrano nel D. Lgs. 264/2006, ovvero non si applica alle gallerie della rete TERN aventi lunghezza superiore a 500 m. In pratica, come richiamato nell'articolo 1, il Decreto sulle infrastrutture risulta complementare a quello sulle gallerie superiori a 500 m. I due decreti, in accordo con le rispettive direttive CE, presentano differenze sia nel campo di applicazione che nelle loro disposizioni, infatti, come vedremo di seguito, il D. Lgs. 264/2006 prevede fondamentalmente dei requisiti minimi di sicurezza, inoltre richiede un diverso approccio per analizzare il rischio di galleria.

La presenza di due documenti legislativi diversi può generare difficoltà quando occorre muoversi in situazioni che abbracciano i due campi di applicazione, come nel caso delle valutazioni di sicurezza di interi tratti stradali che comprendono una o più gallerie di

³ Il D. Lgs. 35/2011 individua come Organo Competente (OC) il Ministero delle infrastrutture e dei trasporti che, per lo svolgimento delle sue funzioni relativamente alla rete stradale non gestita direttamente da Anas S.p.a., si avvale della struttura organizzativa della medesima società che svolge le funzioni di controllo e di vigilanza sulle concessioni autostradali.

Sinteticamente sull'Organo Competente ricadono le seguenti funzioni e responsabilità: classificazione della rete stradale di competenza, responsabilità delle ispezioni sulle strade, responsabilità dei controlli su tutti i progetti ricadenti nell'ambito di applicazione e pianificazione e programmazione degli interventi correttivi.

lunghezza superiore a 500 m. In tali frequenti situazioni è necessario che l'Organo Competente operi in coordinamento con la Commissione permanente per le gallerie⁴ e con le Commissioni intergovernative⁵ (CIG), relativamente ai tunnel transfrontalieri.

E' auspicabile per il futuro una sempre maggiore collaborazione tra gli enti e le figure coinvolte e soprattutto l'emanazione di leggi, norme e linee guida di tipo integrato.

1.2.2 Il D. Lgs. 264/2006

La Direttiva 2004/54/CE, relativa ai requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea, è stata recepita in Italia con il D. Lgs. n. 264 del 5 ottobre 2006. Come precedentemente accennato, l'ambito di applicazione di questo Decreto e quello relativo alle gallerie, situate nel territorio italiano e appartenenti alla rete stradale transeuropea, aventi lunghezza superiore a 500 m. Il Decreto si applica a tutte le gallerie di questo tipo, siano esse in esercizio, in fase di costruzione o allo stato di progettazione. Lo scopo del documento legislativo è garantire un livello minimo di sicurezza agli utenti delle gallerie, attraverso la progettazione e l'adozione di idonee misure di prevenzione degli eventi incidentali e di protezione nel caso si realizzi un incidente. Si evidenzia che nelle finalità del Decreto (articolo 1, comma 1) compare anche il riferimento alla salvaguardia dell'ambiente e degli impianti della galleria stessa, considerati un bene di significativo valore da tutelare.

Tenendo conto dell'argomento caratterizzante la presente ricerca di dottorato, si ritiene interessante evidenziare che nel D. Lgs. 264/2006 emerge chiaramente l'importanza dell'impiantistica elettrica ed elettronica per la sicurezza in galleria e la necessità di realizzare misure di sicurezza basate su una visione olistica dell'insieme galleria-impianti-utenza; a tal proposito si riportano alcuni contenuti presenti negli allegati 1 e 2 del Decreto stesso:

- nell'allegato 1 viene definito "sistema galleria" il complesso costituito dagli elementi strutturali, dall'ambiente circostante, dal traffico, dalle dotazioni di sicurezza impiantistiche e dalle procedure di gestione;

⁴ La Commissione permanente per le gallerie, individuata dal D. Lgs. 264/2006, è un organo tecnico istituito dal Consiglio superiore dei lavori pubblici. Tra i vari compiti, la Commissione deve assicurare il rispetto da parte del gestore di tutti gli aspetti di sicurezza relativi alla galleria.

⁵ Per i trafori internazionali ricadenti nella rete transeuropea le funzioni di cui sopra sono svolte dalle relative Commissioni intergovernative (art. 4, comma 4 del D. Lgs. 264/2006)

- nell'allegato 2 vengono riportati i parametri di sicurezza che caratterizzano una galleria stradale e i requisiti minimi necessari a raggiungere un livello accettabile di sicurezza in relazione alle caratteristiche della galleria e del traffico. I requisiti minimi, individuati a seconda se si tratta di gallerie nuove oppure di gallerie già esistenti, riguardano sia aspetti strutturali (pendenza longitudinale, uscite d'emergenza, piazzole di sosta, ecc.) che numerosi aspetti impiantistici (illuminazione, ventilazione, videosorveglianza, sistemi di comunicazione, ecc.).

Un altro aspetto rilevante del Decreto gallerie è sicuramente quello relativo all'esplicita richiesta di applicare una metodologia basata sull'analisi di rischio quantitativa per valutare la sicurezza delle gallerie esistenti che presentano carenze rispetto ai requisiti di sicurezza di tipo strutturale di cui all'allegato 2, oppure per quelle gallerie che presentano caratteristiche speciali (articolo 4, comma 8) rispetto ai parametri di sicurezza.

L'analisi di rischio deve essere effettuata da un soggetto terzo o indipendente dal gestore della galleria, ma gli oneri restano comunque in capo al gestore.

Tale analisi, così come riportato nell'allegato 3, deve essere mirata ad ottenere una misura quantitativa del rischio di una specifica galleria, su un determinato periodo di tempo e con riferimento a indicatori quantitativi ben definiti.

In pratica, per una galleria esistente, che non possiede tutti i requisiti obbligatori previsti in base ai suoi parametri caratteristici, è possibile raggiungere un adeguamento con misure di sicurezza alternative che siano in grado di ottenere un livello di sicurezza equivalente a quello della "galleria virtuale"⁶. La comparazione in termini di rischio deve essere condotta tra la galleria virtuale e la galleria reale dotata di requisiti alternativi o di compensazione, naturalmente a parità di condizioni di funzionamento.

Nel caso invece che una galleria è da considerarsi speciale rispetto ai parametri di sicurezza, l'analisi di rischio deve dimostrare che l'insieme delle misure di sicurezza adottate (es. prevenzione, protezione e mitigazione della pericolosità, nonché

⁶ Il D. Lgs. 264/2006 definisce "galleria virtuale" la galleria identificata dagli stessi parametri di sicurezza della galleria in esame e che possiede tutti i requisiti minimi obbligatori del gruppo di appartenenza, caratterizzati da specifiche prestazioni in assenza di malfunzionamento.

facilitazione delle azioni relative al soccorso e all'autosoccorso) siano tali da garantire un rischio al di sotto del livello di tollerabilità, considerando anche i malfunzionamenti a livello dei sottosistemi.

La metodologia di analisi, riferita ad una determinata galleria, deve tenere conto di:

- incidentalità
- elementi progettuali della galleria (lunghezza, geometria, pendenza, ecc.)
- caratteristiche prestazionali dei sistemi di sicurezza
- condizioni di traffico (volume, tipologia, ecc.)

L'analisi di rischio, basata su evidenze statistiche generali e su aspetti specifici della galleria sotto esame, deve essere sviluppata con un approccio quantitativo probabilizzato. Occorre comunque precisare che il Decreto riporta che tale metodologia di analisi va applicata esclusivamente agli eventi considerati critici per l'ambiente galleria, come l'incendio, le collisioni con incendio, gli sversamenti di sostanze infiammabili e i rilasci di sostanze tossiche e nocive.

Gli scenari incidentali di galleria e le loro evoluzioni devono essere sviluppate mediante modelli che includano come elementi rappresentativi l'albero delle cause, l'evento critico iniziatore e l'albero degli eventi.

La modellazione del flusso del pericolo, secondo il Decreto, deve essere attuata utilizzando le migliori tecniche note e disponibili, ma è possibile applicare diversi livelli di dettaglio in relazione alle necessità.

I risultati dell'analisi di rischio permettono di costruire diversi indicatori, in particolare il Decreto riporta che il rischio relativo ad una galleria è definito come il valore atteso del danno o come distribuzione delle probabilità di superamento di predeterminate soglie di danno.

Tali aspetti di analisi, tipici dell'ingegneria della sicurezza, introdotti dalla Direttiva europea e di conseguenza dal Decreto italiano, saranno ripresi e approfonditi nel capitolo II.

La seguente figura 1.4, realizzata secondo quanto riportato negli elaborati grafici dell'allegato 3 del D. Lgs. 264/2006, rappresenta i limiti di accettabilità del rischio di galleria sul piano F-N (dove F indica la probabilità di superamento di determinate soglie di danno e N il numero di fatalità). L'area centrale del grafico rappresenta la zona di

accettabilità condizionata o zona cosiddetta ALARP (As Low As Reasonably Practicable), dove occorre svolgere ulteriori indagini e analisi costi-benefici, al fine di individuare azioni di prevenzione e/o mitigazione atte a ridurre, per quanto ragionevolmente praticabile, il valore del rischio.

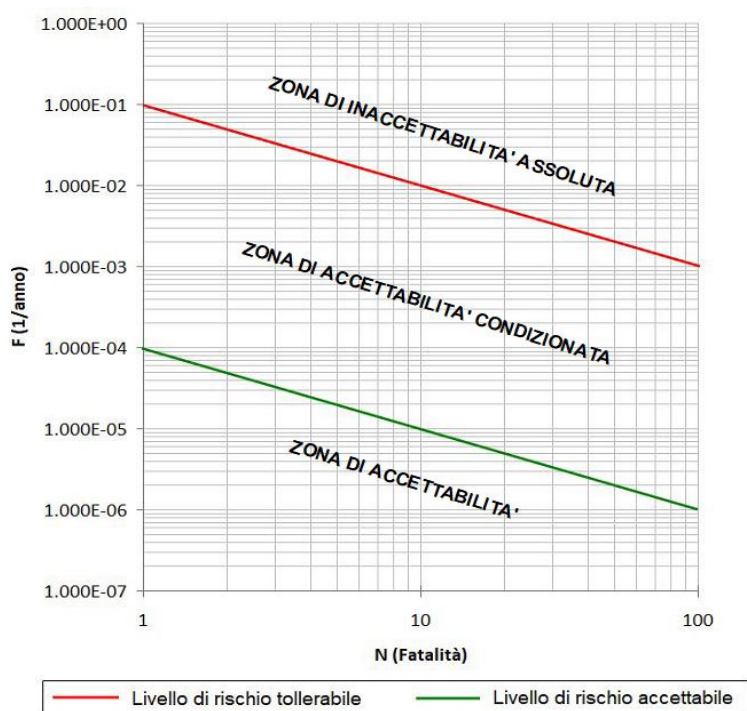


Figura 1.4: criteri di accettabilità del rischio sul piano F-N (Allegato 3, D. Lgs. 264/2006)

Come si è visto, il D. Lgs. 35/2011 sulle infrastrutture stradali (§ 1.3.1) e il D. Lgs. 264/2006 sulle gallerie, richiedono approcci diversi per le valutazioni di sicurezza. A tal proposito, in accordo con i recenti orientamenti della comunità tecnica e in particolare con quanto riportato nella pubblicazione di Rossi, Lombardi e Di Mascio (2018), *Consistency and stability of risk indicators: the case of road infrastructures* [C13], si ritiene opportuno individuare una gestione congiunta delle procedure, al fine di ottenere una visione d'insieme, in grado di apportare un contributo positivo, sia nelle valutazioni di sicurezza in galleria che al riguardo dell'intero tratto stradale.

1.2.3 Linee guida ANAS 2009

Le linee guida realizzate da ANAS⁷, così come riportato nell'introduzione della guida stessa, rappresentano un documento tecnico nazionale che definisce in modo concreto le modalità per progettare la sicurezza delle gallerie stradali in osservanza del D. Lgs. 264/2006. Le linee guida del 2009 rappresentano la seconda edizione del documento, in quanto la prima edizione risale al 2006. Si tratta di un corposo documento di oltre 200 pagine, che ormai rappresenta un riferimento nazionale nell'ambito della sicurezza delle gallerie stradali. I contenuti sono finalizzati a rendere pratica l'applicazione del D. Lgs. 264/2006, dettagliando sia i requisiti minimi strutturali e impiantistici sia descrivendo in modo analitico, e con esempi pratici, il modello di analisi di rischio definito a livello legislativo.

La guida, che comprende anche diversi allegati, è fondamentalmente suddivisa in quattro macro aree o capitoli, i quali possono essere così sintetizzati:

- ***Il progetto della sicurezza***, dove emergono aspetti sulla progettazione prestazionale e sulle valutazioni di sicurezza con approccio probabilistico. Di rilevanza sono le sezioni dedicate alla schedatura del sistema galleria, all'analisi di vulnerabilità e all'analisi del rischio con i tipici metodi dell'ingegneria della sicurezza, che saranno approfonditi nel prossimo capitolo;
- ***Documentazione della sicurezza***, in merito alle fasi di progettazione, manutenzione, monitoraggio e controllo;
- ***Standard ANAS nuove costruzioni***, dove vengono riportate una lunga serie di indicazioni e raccomandazioni di tipo prescrittivo in merito alla realizzazione di elementi strutturali e impiantistici, quali uscite di emergenza, piazzole di sosta, sistema di drenaggio, illuminazione, ventilazione, sistemi di rilevazione, sistemi di mitigazione incendi, segnaletica, sistemi di comunicazione, videosorveglianza, sistemi di controllo e supervisione. Le indicazioni tengono naturalmente conto anche di aspetti di resistenza e reazione al fuoco di strutture e impianti;
- ***Standard ANAS gallerie esistenti***, contiene una modesta serie di raccomandazioni finalizzate alla realizzazione di adeguamenti da valutare e

⁷ ANAS S.p.a., società per azioni italiana integrata dal gennaio 2018 nel Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane. Gestisce circa 30mila km di rete stradale e autostradale di interesse nazionale.

mettere in atto per raggiungere livelli di sicurezza consoni con gli obbiettivi individuati dalla legislazione vigente.

Di seguito si riporta uno schema, tratto dalle linee guida, raffigurante le fasi del processo di progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali.

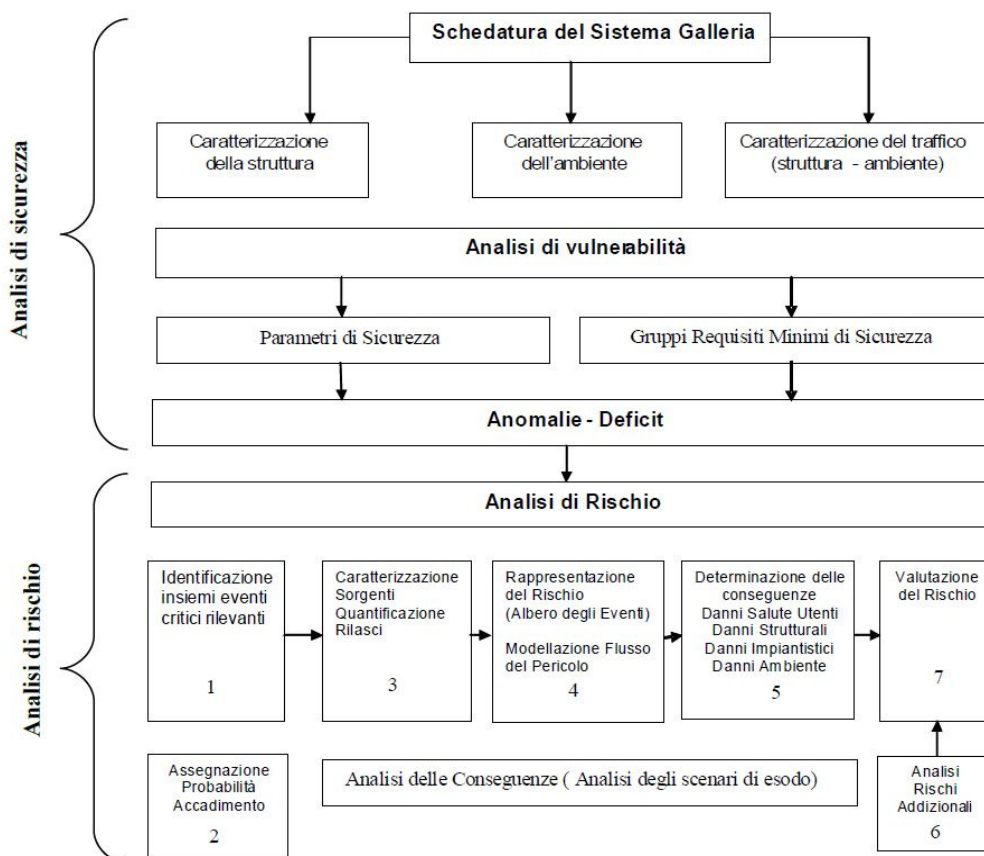


Figura 1.5: fasi del processo di progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali [B1]

Per una comprensione completa e approfondita delle varie fasi del processo della sicurezza in galleria illustrato nella guida ANAS si rimanda alla guida stessa, si riportano comunque di seguito alcuni aspetti, con particolare attenzione per quelli che si ritengono rilevanti per l'argomento principale della presente ricerca.

La guida, in accordo con i dettami legislativi, elenca una serie di parametri che devono essere considerati per individuare le misure di sicurezza necessarie da attuare in galleria:

- lunghezza della galleria;
- volume di traffico per fornice (compresa la distribuzione nel tempo);
- numero di fornici;

- numero di corsie;
- geometria della sezione trasversale;
- allineamento verticale e orizzontale;
- tipo di costruzione;
- traffico unidirezionale o bidirezionale;
- rischio di congestione (giornaliero o stagionale);
- tempo di intervento dei servizi di pronto intervento;
- presenza e percentuale di veicoli pesanti;
- presenza, percentuale e tipo di trasporto di merci pericolose;
- caratteristiche delle strade di accesso;
- larghezza delle corsie;
- considerazioni relative alla velocità;
- condizioni geografiche e meteorologiche.

I parametri caratteristici vengono impiegati nell'analisi degli eventi incidentali per definire le fonti di pericolo, costruire scale per l'ordinamento dei sistemi di sicurezza e stimare il tasso di accadimento di eventi incidentali del sistema galleria. La dipendenza del tasso di accadimento degli eventi incidentali dai parametri di sicurezza caratteristici è determinata applicando modelli di interferenza statistica consolidati e banche dati reperibili in letteratura e riferite allo specifico sistema di galleria in esame.

Le linee guida ANAS propongono anche alcune scale di pericolo, non cogenti, realizzate attraverso l'analisi delle serie storiche di dati sull'incidentalità stradale; di seguito si riporta, a titolo di esempio, la tabella relativa al pericolo in relazione ai limiti di velocità.

V	Traffico-Velocità
	Limiti di velocità
1	50 km/h
2	70 km/h
3	90 km/h
4	100 km/h
5	≥ 110 km/h

Tabella 1.1: scala del pericolo relativo ai limiti di velocità [B1]

Tra i parametri di sicurezza caratteristici, la lunghezza della galleria (L) e il traffico giornaliero medio incidente sulla struttura (TGM), vengono definiti parametri principali. Questi parametri sono particolarmente importanti e la guida ANAS, prendendo a riferimento le indicazioni del D. Lgs. 264/2006, individua una corrispondenza univoca tra gruppi di gallerie e gruppi omogenei di requisiti minimi di sicurezza, così come riportato nella seguente tabella, tratta dalla guida stessa.

Gallerie unidirezionali	500<L<1000	L>1000	500<L<1000	1000<L<3000	L>3000
VT < 2.000 v/g cor	I	II			
VT > 2.000 v/g cor			III	IV	V
Gallerie bidirezionali	500<L<1000	L>1000	500<L<1000	1000<L<3000	L>3000
VT < 2.000 v/g cor	VI	VII			
2.000 < VT < 10.000 v/g cor			VIII	IX	X

Tabella 1.2: corrispondenza tra gruppi di gallerie e gruppi omogenei di requisiti minimi di sicurezza [B1]

I requisiti minimi di sicurezza relativi ad ogni gruppo omogeneo sono riportati nell'allegato 3 delle linee guida.

Nel caso la galleria presenti carenze rispetto ai requisiti minimi di sicurezza, sarà necessario utilizzare l'analisi di rischio prestazionale per dimostrare che le misure di sicurezza alternative o integrative adottate siano tali da realizzare condizioni di sicurezza equivalenti o superiori.

Nella guida vengono individuati anche una serie di requisiti di sicurezza integrativi o alternativi, sia a livello strutturale che impiantistico. Ad esempio, al riguardo delle dotazioni tecnologiche a supporto dell'esodo pedonale, si parla di sistemi a guida ottica (filo di Arianna) e a guida sonora. Si può affermare che il documento ANAS pone più volte l'accento sull'importanza delle dotazioni impiantistiche di sicurezza e in particolare su quelle atte a facilitare l'esodo degli utenti.

In generale le linee guida, considerando l'importanza e la criticità dell'esodo, dedicano ampio spazio a questa delicata fase di emergenza; a tal proposito si segnala il paragrafo "modello di esodo e criteri di sopravvivenza", nel quale vengono date alcune indicazioni per formulare un modello semplificato del processo di esodo degli utenti. I parametri fondamentali indicati sono i seguenti:

- tempi di abbandono dei veicoli da parte degli utenti;
- velocità di esodo degli utenti.

Inoltre:

- modalità di avanzamento degli utenti all'interno della galleria;
- orientamento corretto verso le uscite di sicurezza.

Come sarà illustrato nei prossimi capitoli, si ritiene che il sistema di supporto all'esodo pedonale, individuato nella presente ricerca di dottorato, influenzi positivamente i fattori relativi al corretto orientamento e alla velocità di esodo.

La seguente figura, tratta dalle linee guida, rappresenta la descrizione di uno scenario di esodo.

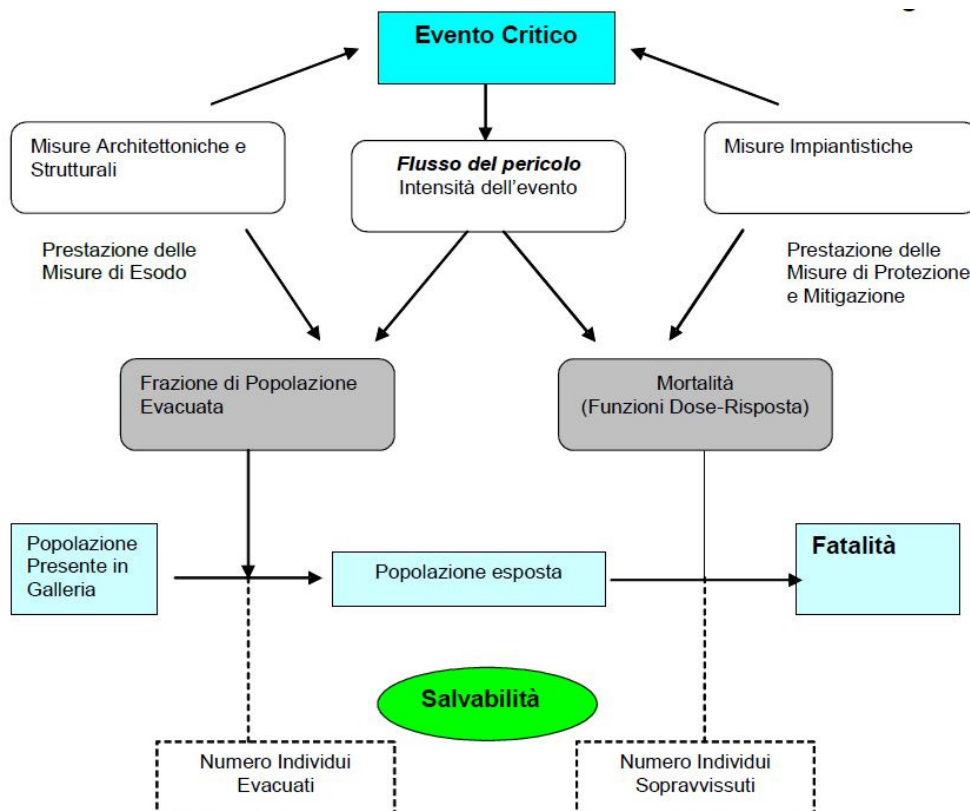


Figura 1.6: descrizione di uno scenario di esodo [B1]

La guida, come si è accennato precedentemente, dopo gli aspetti inerenti all'analisi del rischio e un breve capitolo sulla documentazione della sicurezza, dedica l'intero documento agli standard ANAS per le nuove costruzioni, con alcune raccomandazioni

sull'adeguamento delle gallerie esistenti. Nella guida sono presenti numerose misure prescrittive da adottare sia a livello strutturale che impiantistico. Tra gli aspetti relativi all'impiantistica e alle dotazioni tecnologiche di sicurezza, si ritiene interessante evidenziare quelli inerenti l'illuminazione e la segnalazione del vie di esodo, definite illuminazione di sicurezza.

A tal proposito la guida sottolinea che l'illuminazione di sicurezza deve essere in grado di assicurare:

- l'indicazione chiara e non ambigua delle vie di fuga;
- l'illuminazione delle vie di fuga;
- l'individuazione delle dotazioni di sicurezza a servizio degli utenti;
- l'indicazione del verso di percorrenza, in allontanamento dal luogo di incendio.

Il quarto punto sopra riportato e le ulteriori indicazioni presenti nelle linee guida, evidenziano esplicitamente la necessità di fornire all'utente un'indicazione chiara circa il verso da seguire per allontanarsi dall'incendio e abbandonare l'infrastruttura nel modo più sicuro possibile. Nella guida infatti vengono fornite indicazioni per la realizzazione di un sistema a led per illuminare il camminamento in prossimità del paramento di galleria. Tale sistema, che può essere installato lungo la parete o la barriera redirettiva (figura 1.7 e figura 1.8), deve fornire, in caso di emergenza, sia i livelli di illuminamento prescritti che la segnalazione del verso di percorrenza. Questa seconda funzione, spiega la guida, si ottiene con l'accensione sequenziale di gruppi di led di colore verde (7 gruppi ogni 3 m di percorso), in modo da realizzare un movimento apparente avente una velocità compresa tra 7 e 8 m/s. Il verso dell'indicazione dovrà essere fornito dal sistema di controllo e supervisione di galleria, in base alla posizione dell'evento incidentale. Inoltre la guida specifica che un eventuale guasto o incidente, che coinvolga un elemento luminoso, non deve interessare più di 30 m di tratta.

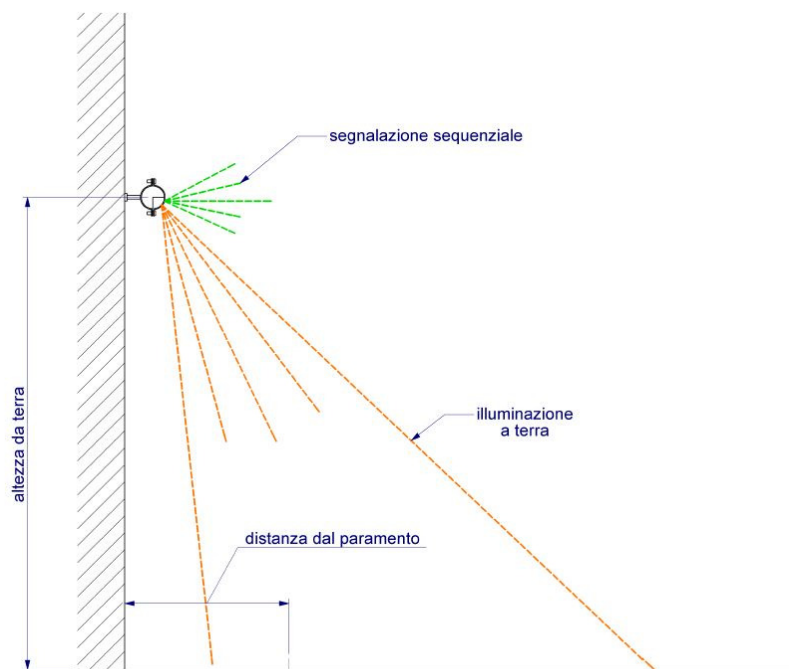


Figura 1.7: particolare relativo all'illuminazione delle vie di esodo con dispositivi per montaggio a paramento, protetti meccanicamente da corpo tubolare in acciaio inossidabile AISI 304 o in alluminio anodizzato - tratto dalla guida ANAS 2009 [B1]

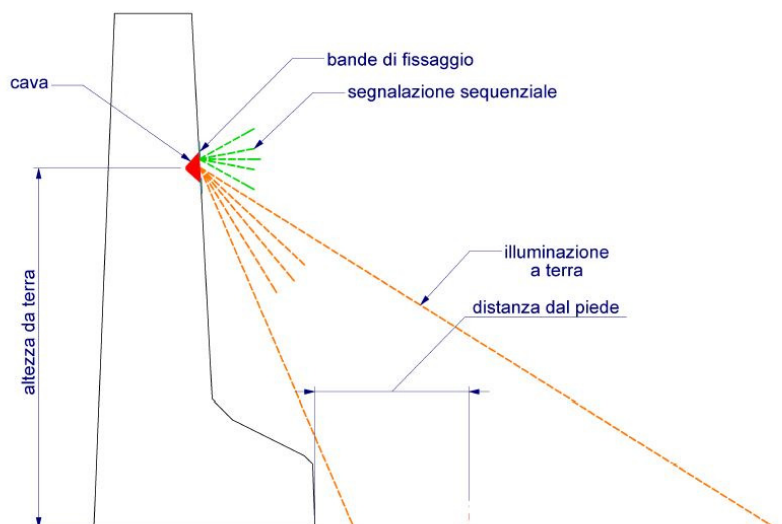


Figura 1.8: particolare relativo all'illuminazione delle vie di esodo con dispositivi installati sulla barriera redirettiva, in apposita cava posta ad un'altezza da terra compresa tra 60 e 80 cm - tratto dalla guida ANAS 2009 [B1]

In merito all'indicazione del verso di esodo, il sistema indicato dalla guida ANAS presenta un'indubbia utilità, ma si ritiene opportuno studiare altre soluzioni a supporto di quella proposta, al fine di compensare alcune criticità, come ad esempio quelle relative alla ridotta visibilità in presenza di densi fumi, oppure in presenza di ostacoli visivi (es. veicoli, soprattutto di tipo pesante). Inoltre si evidenzia che il sistema proposto, dovendo garantire un funzionamento affidabile e una sequenza luminosa sempre interpretabile, richiede caratteristiche di fidatezza elettrica e meccanica (immunità da guasti, urti e incendio) che possono assumere costi significativi, in particolare nell'adeguamento delle gallerie esistenti. In ogni caso, allo stato attuale, tale sistema d'informazione luminosa risulta poco applicato.

Nell'ambito dei sistemi di supporto all'evacuazione di emergenza, nella presente ricerca di dottorato, è stato studiato un sistema in grado di portare un contributo all'autosoccorso durante l'esodo pedonale, in particolare attraverso la localizzazione dell'utente e l'indicazione puntuale del percorso ottimale da seguire per abbandonare la galleria.

1.2.4 La norma CEI 64-20

Nell'agosto del 2015 il Comitato Elettrotecnico Italiano ha pubblicato la norma CEI 64-20, dedicata agli impianti elettrici delle gallerie stradali. Lo scopo della presente norma è quello di fornire i criteri da seguire per la progettazione, la realizzazione e la verifica degli impianti elettrici in un ambiente particolare come appunto quello delle gallerie stradali. La norma, come specificato nel documento, non si applica alle gallerie in fase di scavo, a quelle esclusivamente militari e alle gallerie minerarie.

La norma, tenendo conto delle caratteristiche e delle esigenze di sicurezza proprie dell'ambiente galleria, per alcuni aspetti ritiene sufficiente richiamare direttamente le tipiche normative sull'impiantistica elettrica, mentre per altri, più delicati, introduce nuove prescrizioni⁸, in particolare descrive l'utilizzo e le caratteristiche dei circuiti ordinari, di emergenza e di sicurezza (§ 1.1.1).

⁸ In galleria, al riguardo dell'impiantistica elettrica in bassa tensione (fino a 1000 V in corrente alternata e 1500 V in corrente continua), occorre fare riferimento alle sezioni generali della norma CEI 64-8, alla sezione 751 della CEI 64-8 (ambienti a maggior rischio in caso di incendio) e alle ulteriori indicazioni della CEI 64-20, specifica per l'ambiente delle gallerie stradali.

La CEI 64-20, essendo un documento normativo specifico, fornisce diversi dettagli su come realizzare gli impianti in galleria; la figura 1.9, ad esempio, rappresenta un dettaglio progettuale realizzato seguendo quanto illustrato nella norma in merito alla segregazione dei cavidotti dietro il profilo redirettivo.

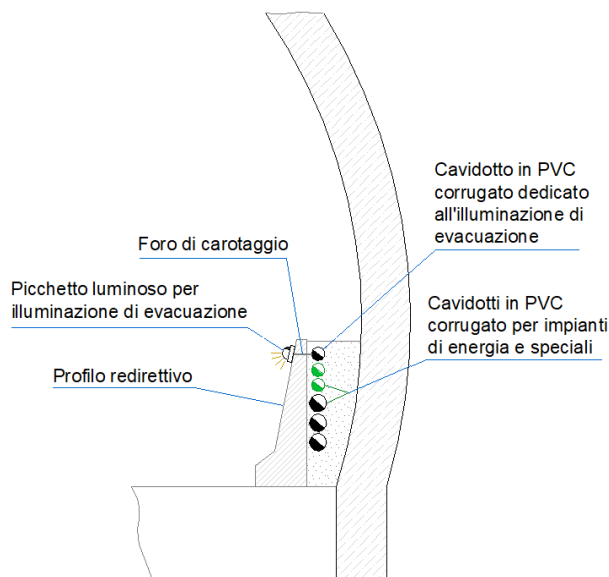


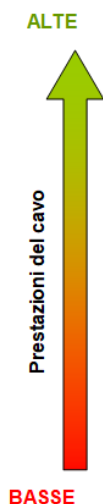
Figura 1.9: esempio di segregazione dei cavidotti, secondo CEI 64-20 [B9]

La norma, per motivi legati all'affidabilità dei circuiti e per limitare le emissioni di fumi tossici in caso di incendio, tiene dovuto conto degli aspetti inerenti la resistenza e la reazione al fuoco delle condutture elettriche. In galleria tutti cavi devono essere del tipo non propagante l'incendio, senza alogeni e a bassa emissione di fumi opachi, gas tossici e corrosivi. Inoltre i cavi dei circuiti di emergenza e di sicurezza, installati a vista, devono anche essere resistenti al fuoco, secondo le norme EN 50200 o EN 50362. Occorre comunque precisare che la norma CEI 64-20 non è stata ancora aggiornata al Regolamento UE 305/2011 sui prodotti da costruzione (recepito in Italia con il D. Lgs. 106/2017), che prescrive nuove caratteristiche di reazione al fuoco per i cavi da utilizzare nelle opere di ingegneria civile. Dato che il documento CEI non riporta ancora le sigle e la classe di reazione al fuoco dei nuovi cavi (cosiddetti CPR - Construction Products Regulation), sarà necessario individuare le opportune corrispondenze tra vecchi e nuovi cavi, seguendo le apposite normative⁹. Ad esempio, al posto del cavo multipolare FG7OM1, richiamato nel commento 6.1.4.1 della CEI 64-20, si dovrà

⁹ Ad esempio la norma CEI UNEL 35016, in accordo con le indicazioni della norma CEI 64-8, individua le classi di reazione al fuoco dei cavi CPR in relazione al luogo di installazione.

impiegare il cavo FG18OM16 con classe di reazione al fuoco B2_{ca}-s1a,d1,a1, che risulta essere quella raccomandata dalle normative e linee guida italiane per l'impiego nelle gallerie di lunghezza superiore a 500 m. La classe B2_{ca}-s1a,d1,a1 è quella con il miglior comportamento al fuoco tra le 4 classi individuate dalle normative italiane¹⁰.

Per completezza, attraverso la tabella 1.3, elaborata seguendo le indicazioni normative, in particolare facendo riferimento alla norma CEI UNEL 35016 [B12], si elencano le quattro classi di reazione al fuoco previste in Italia.



Classe di reazione al fuoco del cavo	Parametro principale*	Parametri aggiuntivi*			Livello di rischio dei luoghi di impiego
	Prove al fuoco	Fumo	Gocce	Acidità	
B2 _{ca} -s1a,d1,a1	B2 _{ca}	s1a	d1	a1	ALTO (ad esempio gallerie stradali di lunghezza superiore ai 500 m)
C _{ca} -s1b,d1,a1	C _{ca}	s1b	d1	a1	MEDIO
C _{ca} -s3,d1,a3	C _{ca}	s3	d1	a3	BASSO
E _{ca}	E _{ca}	Non richiesti			BASSO (posa singola del cavo)

* Per i requisiti associati a ciascun parametro si rimanda alla norma CEI UNEL 35016

Tabella 1.3: Classi di reazione al fuoco cavi CPR , secondo CEI UNEL 35016 [B12]

Visto il particolare ambiente, la norma non si limita solo ad indicare le caratteristiche dei cavi da utilizzare in relazione alla tipologia di circuito (ordinario, di emergenza o di sicurezza), ma tiene anche conto degli aspetti termici che interessano la galleria in caso di incendio e fornisce indicazioni circa la tipologia e la posizione di posa delle condutture, in relazione alla suddivisione dell'ambiente in zone termiche. Ad esempio i circuiti ordinari relativi alla distribuzione principale orizzontale (condutture dai quadri

¹⁰ Si precisa che a livello europeo sono state previste ben 7 classi di reazione al fuoco (alle quali associare i parametri addizionali), mentre in Italia le normative prevedono solo 4 classificazioni, come riportato nella tabella 1.3. Non è stata recepita la classe più scadente (F_{ca}), ma purtroppo risultano assenti anche le Classi con le prestazioni più elevate (B1_{ca} e A_{ca}).

elettrici ai punti di derivazione di settore) devono essere posati in zona ZEP (zona ad esposizione protetta) o in zona ZEB (zona ad esposizione bassa), mentre la distribuzione locale (salite verticali di ogni settore) e la distribuzione terminale (dalle cassette di distribuzione locali fino ai componenti del sistema) possono essere realizzate in zona ZEM (zona ad esposizione media) e in zona ZEE (zona ad esposizione elevata). Di seguito si riporta un'immagine relativa alle zone termiche di galleria, realizzata seguendo quanto illustrato nella norma CEI 64-20.

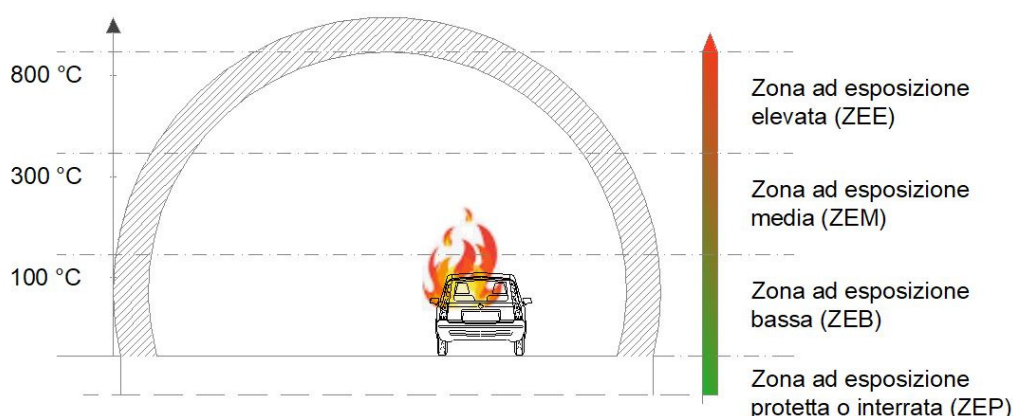


Figura 1.10: suddivisione della sezione di galleria in zone di esposizione termica in caso di incendio, secondo CEI 64-20 [B9]

La norma, oltre alle condutture, fornisce anche diverse indicazioni in merito alla scelta e all'installazione di altri componenti elettrici, tra cui quadri elettrici, prese a spina, apparecchi d'illuminazione, cassette di derivazione, ecc. Rimandando alla norma stessa per una completa comprensione delle prescrizioni, si segnala anche la presenza di diverse tavole grafiche, contenute nell'allegato A e relative a semplici esempi di alcuni impianti di galleria.

2.0 CAPITOLO II - Aspetti generali di affidabilità e valutazione del rischio

2.1 Concetti di base e definizioni

L'affidabilità di funzionamento di un sistema e le condizioni di sicurezza in caso di guasto o malfunzionamento sono aspetti prestazionali di fondamentale importanza da tener conto in ogni progettazione ingegneristica, in particolare quando si è chiamati a realizzare sistemi che sono direttamente preposti a fornire funzioni di sicurezza. L'applicazione della teoria dell'affidabilità consente di valutare se un sistema sarà funzionante per un certo periodo di tempo, oppure se funzionerà nell'istante in cui viene richiesto il suo intervento (funzionamento su chiamata o disponibilità), mentre l'utilizzo delle tecniche di analisi del rischio permettono di valutare il danno atteso a persone o beni materiali in caso di malfunzionamento del sistema stesso.

Nell'ambito degli aspetti relativi al funzionamento di un sistema si definisce:

- **sistema:** insieme di parti che interagiscono per compiere una determinata funzione. Un sistema può essere scomposto in più componenti che a loro volta possono essere considerati sottosistemi;
- **guasto:** cessazione dell'attitudine di un sistema a svolgere correttamente una determinata funzione. Il sistema, a seguito di un guasto, si porta da una condizione di buon funzionamento ad una di avaria;
- **incidente:** condizione evoluta di guasto che, a seguito di una sequenza di eventi, realizza un flusso di pericolo verso i valori esposti (persone, cose, ambiente o sistema stesso);
- **pericolo:** capacità potenziale di un sistema di realizzare un danno;
- **danno:** misura delle conseguenze negative derivante dal verificarsi dell'incidente;
- **rischio:** misura probabilistica della concretizzazione del pericolo; si può esprimere sinteticamente con il prodotto tra la probabilità di accadimento dell'incidente e il danno conseguente;
- **affidabilità:** probabilità che il sistema assolva correttamente alle funzioni richieste per un determinato periodo di tempo in condizioni predeterminate;

Il fenomeno del guasto risulta di primaria importanza nell'ambito degli studi di affidabilità e sicurezza dei sistemi. In particolare le metodologie di analisi e di gestione dell'affidabilità, basate su un approccio RAMS¹¹, consentono di progettare la probabilità di guasto di un sistema agendo su diversi fattori, quali ad esempio la realizzazione di ridondanze e l'implementazione di opportuni interventi di manutenzione preventiva. Mentre le tecniche di valutazione e gestione del rischio, basati su un approccio di *Risk Analysis*, permettono di progettare il livello di sicurezza complessivo del sistema attraverso la valutazione del danno atteso (conseguenze dovute all'evoluzione del guasto) e la gestione del flusso del pericolo (ad esempio attraverso l'intervento di sistemi di sicurezza alternativi o compensativi), in modo da convogliare l'evoluzione del guasto verso scenari finali controllati che realizzino un rischio inferiore a determinate soglie di accettabilità.

La figura seguente schematizza quanto descritto.

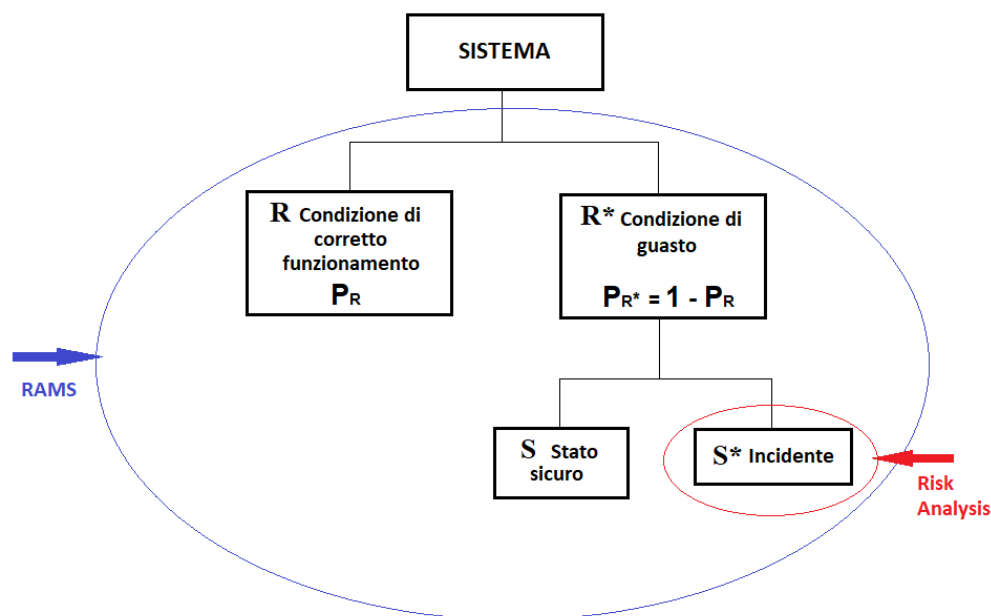


Figura 2.1: partizione logica dell'analisi di affidabilità e di sicurezza di un sistema

In riferimento alla figura 2.1, si definisce:

- R: configurazione del sistema in condizione di corretto funzionamento;
- R*: sistema in condizioni di guasto o malfunzionamento;

¹¹ RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability, and Safety*): approccio ingegneristico che tiene conto di aspetti relativi all'affidabilità, alla disponibilità, alla manutenibilità e alla sicurezza. Nel prossimo paragrafo sarà approfondito tale argomento.

- S: configurazione ritenuta ancora sicura, in quanto il rischio che si realizza nei confronti di persone o cose risulta minore di una determinata soglia di accettabilità;
- S*: condizione di pericolo.

2.2 Progettare con approccio RAMS

Una buona parte dei sistemi tecnologici presenti in una galleria stradale sono direttamente preposti a fornire funzioni di sicurezza, inoltre in tale ambiente anche i sistemi definiti ordinari influiscono significativamente sulla sicurezza complessiva di questa particolare infrastruttura stradale. Per questo motivo risulta di fondamentale importanza adottare un approccio olistico di progettazione, in grado di considerare la cosiddetta *dependability* del sistema stesso, cioè la sua fidatezza di funzionamento. Il termine *dependability* viene utilizzato per descrivere in modo unitario le caratteristiche di un sistema in termini di affidabilità, disponibilità, manutenibilità e sicurezza; tale approccio prende il nome di RAMS e si esplicita nelle seguenti caratteristiche:

- **Reliability**: attitudine di un sistema ad assolvere alla funzione richiesta per un periodo di tempo determinato e nelle condizioni stabilite;
- **Availability**: attitudine di un sistema ad assolvere alla funzione richiesta a un dato istante e nelle condizioni stabilite;
- **Maintainability**: attitudine di un sistema, che si trova nelle condizioni stabilite, ad essere mantenuto o ripristinato allo stato di corretto funzionamento, in modo da poter assolvere alle funzioni richieste. Occorre inoltre considerare che la manutenzione deve essere realizzata in condizioni specificate e utilizzando tecniche, procedure e mezzi predeterminati;
- **Safety**: attitudine di un sistema a rispettare un livello accettabile di rischio per persone, cose e ambiente.

Risulta ovvio, che il livello di fidatezza di un sistema dovrà essere individuato in considerazione dell'incremento di rischio generato in caso di guasto e in rapporto alla sostenibilità economica, per la quale si rende necessaria anche un'analisi costi-benefici.

2.3 Il guasto di un componente e la sua affidabilità

Come è noto, il fenomeno del guasto riveste un ruolo primario negli studi sull'affidabilità dei componenti e dei sistemi; tale evento infatti rappresenta la cessazione dell'attitudine di un'entità a svolgere la funzione richiesta. In pratica il guasto modifica lo stato dell'entità da quello di buon funzionamento a quello di avaria.

Tra i guasti spontanei si possono elencare tre diverse tipologie:

- **guasti infantili:** sono caratteristici del periodo di vita iniziale del componente, tale guasti sono generalmente dovuti a difetti costruttivi o mancanze nel processo di controllo della qualità. La prevenzione dei guasti infantili è basata principalmente sul controllo del processo di produzione e sull'implementazione di adeguate fasi di rodaggio, atte ad individuare i componenti difettosi;
- **guasti da usura o fatica:** sono dovuti all'invecchiamento dei componenti. Questi guasti possono essere contrastati con adeguati piani di manutenzione programmata;
- **guasti casuali:** avvengo casualmente, ma presentano una frequenza che risulta generalmente costante se si considera un periodo di tempo sufficientemente lungo. Sono caratteristici del periodo di vita utile del componente e per lo più sono dovuti ad accumuli di sollecitazioni. In generale, se si vuol mantenere nel tempo i livelli di affidabilità previsti, occorre effettuare una sostituzione preventiva del componente prima della fine della vita utile.

Attraverso approcci statistici basati sul comportamento di componenti in esercizio, oppure attraverso i risultati di prove e simulazioni di laboratorio, è possibile ricavare dei modelli di guasto in grado di rappresentare, con buona approssimazione, il comportamento atteso nel tempo del componente.

In figura 2.2 si riporta la nota curva, cosiddetta a vasca da bagno, che descrive genericamente la propensione al guasto dei componenti nel tempo e individua le tipologie di guasto precedentemente descritte.

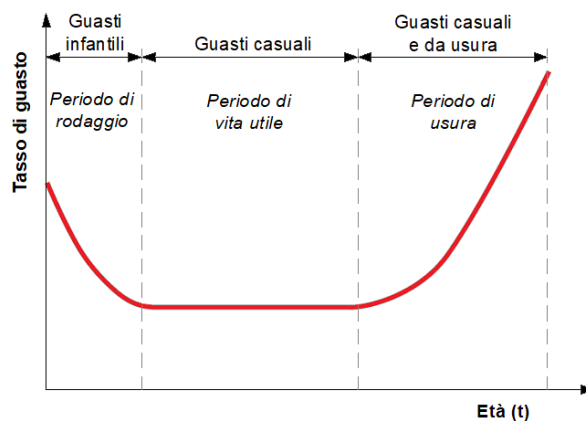


Figura 2.2: propensione al guasto nel tempo di un componente

Quando un componente è inserito in un sistema più complesso è possibile distinguere i guasti anche in relazione agli effetti sull'affidabilità e sicurezza dell'intero sistema:

- **guasti primari:** quelli che determinano una riduzione dell'affidabilità del sistema;
- **guasti secondari:** quelli che comportano solo un degrado della condizione di massima funzionalità ed efficienza del sistema;
- **guasti critici:** quelli che determinano condizioni di non sicurezza del sistema; possono ad esempio rappresentare un rischio per persone e cose.

Il funzionamento di un sistema o di determinati componenti può essere previsto per operare continuamente oppure in specifici istanti di tempo (*on demand*). Un esempio delle due modalità di funzionamento può essere individuato nei sistemi per l'illuminazione di sicurezza, i quali possono essere S.A. (sempre accesi) oppure S.E. (solo emergenza); nel primo caso le lampade devono rimanere sempre accese, sia in condizioni ordinarie che di emergenza, mentre nel secondo caso devono accendersi solo in condizioni di emergenza, quando manca l'alimentazione all'illuminazione ordinaria.

Generalmente, per semplificare i modelli affidabilistici, si prevedono solo due stati di funzionamento; funzionante e guasto. Riferendosi a questi due stati e assegnando un'unità di tempo piccola a piacere dt , si può definire il tasso di guasto come la funzione $\lambda(t)$, tale che $\lambda(t) \cdot dt$ rappresenti la probabilità che un componente, supposto ancora funzionante al tempo t , si guasti in un tempo compreso tra t e $t+dt$. Il pratica il tasso di guasto (figura 2.2), che può essere interpretato come la velocità con la quale si verifica il guasto, consente di caratterizzare la propensione al guasto di un componente

sopravvissuto sano sino ad un determinato tempo t . Di seguito si riporta una tipica relazione del tasso o rateo di guasto:

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_f(t)} \cdot \frac{dN_g(t)}{dt} \quad (2.1)$$

dove:

- dN_g = numero di componenti che si guastano tra t e $t+dt$;
- N_f = numero di componenti funzionanti al tempo t , cioè sopravvissuti tra 0 e t .

Se invece si vuole conoscere la probabilità di guasto riferendosi però ad una popolazione di componenti sana al tempo $t=0$, la funzione prende il nome di densità di probabilità di guasto $f(t)$. La notevole differenza tra le funzioni $\lambda(t)$ e $f(t)$ scaturisce proprio dal diverso riferimento temporale preso in considerazione per identificare la popolazione sana di componenti; il tasso di guasto fa infatti riferimento ad una popolazione sana al generico tempo t , quindi ad una popolazione meno numerosa o al limite uguale a quella originaria relativa al tempo $t=0$, che rappresenta invece il riferimento temporale della densità di probabilità di guasto.

Nella figura 2.3 si riporta un esempio di rappresentazione grafica di una funzione continua di densità di probabilità di guasto, relativa alla variabile casuale normale.

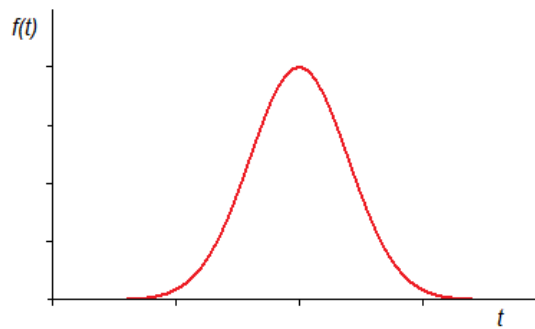


Figura 2.3: rappresentazione della funzione densità di probabilità di guasto $f(t)$, relativa alla variabile casuale normale

Integrando la funzione $f(t)$ tra 0 e t si ottiene l'inaffidabilità $F(t)$ del componente al tempo t :

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (2.2)$$

Dato che un componente prima o poi si guasta, l'area sottesa dalla funzione $f(t)$ sarà uguale all'unità:

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (2.3)$$

Il complemento ad 1 dell'inaffidabilità $F(t)$ rappresenta invece l'affidabilità $R(t)$ del componente:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2.4)$$

Graficamente, definita una funzione $f(t)$ e una generica retta $t=t^*$, come nell'esempio di figura 2.4, è possibile individuare due aree sottese dalla funzione stessa; l'area color rosa rappresenta l'inaffidabilità del componente al tempo $t=t^*$, mentre quella azzurra rappresenta la sua affidabilità allo stesso istante temporale.

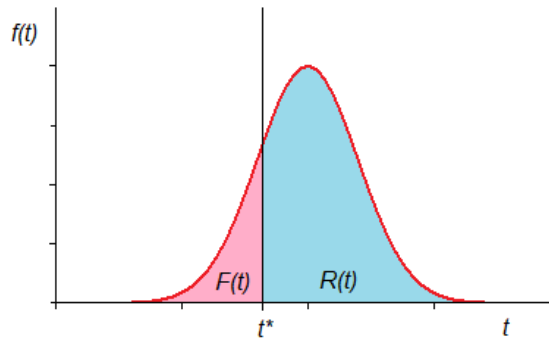


Figura 2.4: inaffidabilità $F(t)$ e affidabilità $R(t)$ di un componente al tempo t^*

Un importante parametro è quello relativo al tempo medio di funzionamento o tempo atteso al guasto, detto MTTF (Mean Time To Failure), il quale è esprimibile anche richiamando l'affidabilità attraverso la seguente relazione:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.5)$$

Nel caso invece di componenti riparabili è necessario considerare anche i tempi di riparazione e un parametro significativo è rappresentato proprio dal tempo medio che intercorre tra l'istante di guasto e quello in cui il componente viene rimesso in servizio; tale parametro viene definito MTTR (Mean Time To Repair). Utilizzando invece il

parametro MTBF (Mean Time Between Failures) è possibile esprimere il tempo medio tra due guasti successivi.

Analogamente al tasso di guasto, visto precedentemente, è possibile parlare di tasso di riparazione $\lambda_g(t)$, tale che $\lambda_g(t) \cdot dt$ rappresenti la probabilità che il componente guasto venga riparato nell'intervallo dt .

Quando il componente è riparabile per esprimere la probabilità che al tempo t si trovi nello stato di buon funzionamento è opportuno parlare di disponibilità $A(t)$ del componente, tale grandezza infatti tiene anche conto degli aspetti legati al servizio di manutenzione. In pratica, elevati valori di disponibilità scaturiscono da alti valori di affidabilità (bassa probabilità di guasto) associati ad alti valori di manutenibilità (elevata probabilità di manutenzione efficace svolta in tempi brevi). A seconda delle necessità si utilizzano diversi indici di disponibilità; di seguito si riporta una tipica relazione della disponibilità intrinseca A_i (ambiente ideale per assolvere alla manutenzione, dove vi è piena disponibilità di ricambi, attrezzatura, personale qualificato, ecc.):

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR_g} \quad (2.6)$$

dove $MTTR_g$ rappresenta il tempo tecnico medio di manutenzione correttiva.

Generalmente i componenti elettronici, come appunto quelli utilizzati in questa ricerca, dopo un periodo di vita iniziale, interessato dal fenomeno della mortalità infantile, presentano un lungo periodo di vita utile, dove, come abbiamo visto, il tasso di guasto è caratterizzato da un andamento pressoché costante. Per tale motivo il comportamento dei componenti elettrici ed elettronici, dopo la fase iniziale, viene spesso rappresentato da modelli affidabilistici basati su funzioni di densità di probabilità di guasto che hanno un andamento esponenziale negativo. Con un tasso di guasto idealmente costante, $\lambda(t)=\lambda$, le relazioni si semplificano come di seguito:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.8)$$

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.9)$$

In figura 2.5 si riportano le rappresentazioni grafiche delle funzioni relative alla distribuzione esponenziale negativa.

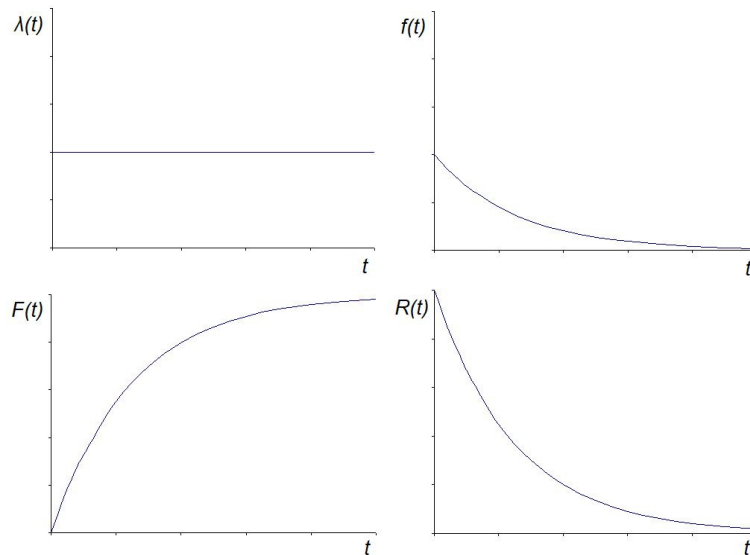


Figura 2.5: rappresentazione grafica delle funzioni relative alla distribuzione esponenziale negativa

I modelli basati su tassi di guasto costanti, essendo privi di memoria, non sono adatti a rappresentare la vita dei componenti soggetti ad usura, come ad esempio quelli meccanici. Si ritiene comunque che anche con i componenti elettrici ed elettronici occorre un utilizzo molto prudente di questo modello ideale di guasto, in quanto si possono avere significative variazioni della propensione al guasto in relazione alla tipologia di componente, ai parametri elettrici, alle condizioni ambientali e a quelle di uso e manutenzione.

Tali aspetti, come è intuibile e come accade nella maggior parte dei casi, assumono notevole rilevanza e sono di difficile modellazione quando i sistemi sono particolarmente complessi, come ad esempio quelli realizzati con numerose tipologie di componenti (circuiti integrati, transistor, capacitori, relè, connettori, condutture, ecc.). Certamente per individuare con buona approssimazione la vita utile e in generale la propensione al guasto di un componente elettrico o elettronico, e ancor di più di un elemento complesso formato da diversi componenti, risultano utilissimi i dati sperimentali e statistici forniti dai costruttori.

Per calcolare il tasso di guasto di un componente nelle condizioni operative, a partire dalle condizioni di riferimento, sono reperibili in letteratura diverse indicazioni e linee

guida, tra cui la norma EN 61709 del maggio 2017 [B25], della quale si riporta un modello generale per calcolare l'influenza delle sollecitazioni sul tasso di guasto:

$$\lambda = \lambda_{ref} \cdot \pi_U \cdot \pi_I \cdot \pi_T \cdot \pi_E \cdot \pi_S \cdot \pi_{ES} \quad (2.10)$$

dove:

λ = tasso di guasto nelle condizioni operative;

λ_{ref} = tasso di guasto nelle condizioni di riferimento;

π_U = fattore dipendente dalla tensione (tiene conto anche della tensione nominale del componente);

π_I = fattore dipendente dalla corrente (tiene conto anche della corrente nominale del componente);

π_T = fattore dipendente dalla temperatura;

π_E = fattore dipendente dalle condizioni ambientali (ambienti protetti dalle intemperie, parzialmente protetti, uso stazionario, uso mobile);

π_S = fattore dipendente dalla frequenza di commutazione (si applica ai relè);

π_{ES} = fattore dipendente dallo stress elettrico (si applica solo a determinati dispositivi).

La norma fornisce inoltre i valori delle condizioni di riferimento e altri modelli con specifici fattori di sollecitazione, a seconda del tipo di componente (semiconduttori integrati e discreti, componenti optoelettronici, capacitori, resistori, connettori, ecc.).

2.4 Fail safe

In ogni buon progetto occorre far sì che il guasto di un componente o dell'intero sistema non sia causa di incidenti a persone o cose. Come si è già detto, tali aspetti assumono particolare rilevanza quando i sistemi stessi sono preposti a fornire funzioni di sicurezza. In questo caso, per evitare che la condizione di guasto non evolvi in una condizione di incidente, è necessario prevedere il ripiego a condizioni di funzionamento alternative o compensative. Quando i sistemi o i dispositivi sono a prova di guasto pericoloso o a sicurezza intrinseca si possono definire *fail safe*. Ad esempio, nell'ambito dei circuiti elettronici per il controllo di allarmi, quello di tipo bilanciato presenta significative caratteristiche *fail safe* rispetto ai semplici circuiti normalmente aperti o normalmente chiusi; tale sistema infatti non può essere inibito dall'interruzione del cavo (circuito aperto) o dalla sua fusione (circuito chiuso). Nei sistemi

particolarmente complessi, quando una vera e propria sicurezza intrinseca non è realizzabile, è possibile raggiungere un certo livello di *fail safe* attraverso l'introduzione di ridondanze attentamente progettate, in grado di doppiare o addirittura moltiplicare, attraverso strade indipendenti, la stessa funzione di sicurezza.

Come vedremo l'affidabilità della funzione è stata presa in considerazione anche nello sviluppo del sistema di localizzazione indoor di questa ricerca. Per completezza, nel paragrafo successivo, saranno richiamati alcuni aspetti di base relativi alla teoria dell'affidabilità dei sistemi.

2.5 Affidabilità dei sistemi

Come è noto l'analisi di affidabilità di un sistema o di un insieme di componenti è finalizzata principalmente a valutare la probabilità di corretto funzionamento del sistema stesso.

Nei sistemi relativamente semplici, dove è possibile assumere per i singoli elementi solo due stati di funzionamento (funzionante o non funzionante) ed è trascurabile la correlazione tra i guasti, si può stimare l'affidabilità dell'intero sistema attraverso l'utilizzo di semplici modelli probabilistici basati sul calcolo combinatorio e sulla logica dei grafi, naturalmente partendo dai valori affidabilistici dei singoli elementi.

Gli schemi combinatori più semplici sono due: combinazione *serie* e combinazione *parallelo*. A livello affidabilistico, un sistema serie è in grado di funzionare solo se tutti i componenti sono funzionanti, mentre in un sistema parallelo il funzionamento di un solo componente garantisce il funzionamento del sistema. Di seguito si riportano le rappresentazioni grafiche e le relazioni matematiche relative a queste due configurazioni affidabilistiche.



Figura 2.6: schema elementare sistema affidabilistico tipo serie

Nell'ipotesi di indipendenza dei guasti:

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2.11)$$

Quando si desidera aumentare l'affidabilità di un sistema serie conviene intervenire sul componente che presenta il valore minore di affidabilità.

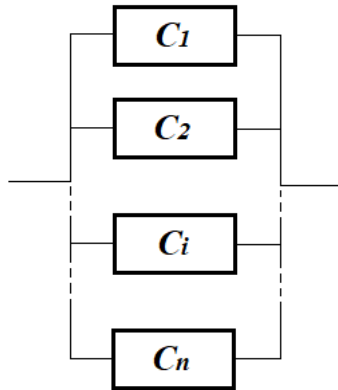


Figura 2.7: schema elementare sistema affidabilistico tipo parallelo

Nell'ipotesi di ridondanza totale e indipendenza dei guasti:

$$R_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (2.12)$$

Quando si desidera aumentare l'affidabilità di un sistema parallelo conviene, a parità di intervento, investire sul componente che presenta il valore maggiore di affidabilità.

I sistemi un po' più complessi, come quelli riportati nella figura 2.8, possono essere facilmente ricondotti a sistemi elementari serie/parallelo. Nel caso A si procede prima a calcolare l'affidabilità dei rami serie e poi si esegue il parallelo dei due risultati ottenuti, mentre nel caso B si calcolano prima i paralleli e poi si risolve la serie.

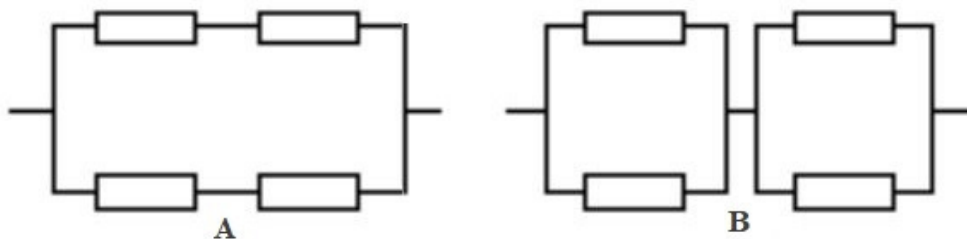


Figura 2.8: schema serie-parallelo (A) e parallelo-serie (B)

Quando la complessità aumenta ulteriormente, come nell'esempio di figura 2.9, che rappresenta una configurazione *bridge* o a ponte, è necessario riferirsi a metodologie risolutive più avanzate, come ad esempio quelle *tie-set* e *cut-set*.

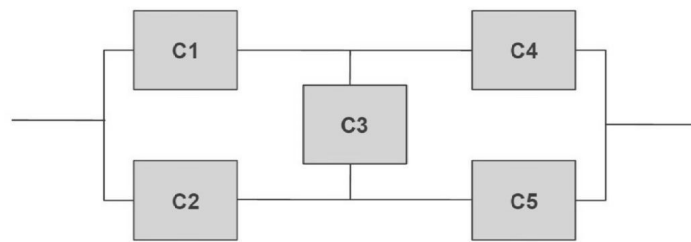


Figura 2.9: esempio di schema complesso (bridge)

Riferendosi alla figura 2.9, emerge chiaramente che il sistema può funzionare correttamente se almeno uno dei seguenti percorsi risulta funzionante: C1-C4, C2-C5, C1-C3-C5 e C2-C3-C5.

Nell'ipotesi di componenti a funzionamento indipendente è possibile suddividere il sistema nei due sottosistemi SS1 e SS2 mutuamente esclusivi, dove il componente C3 viene ipotizzato rispettivamente funzionante e guasto (figura 2.10).

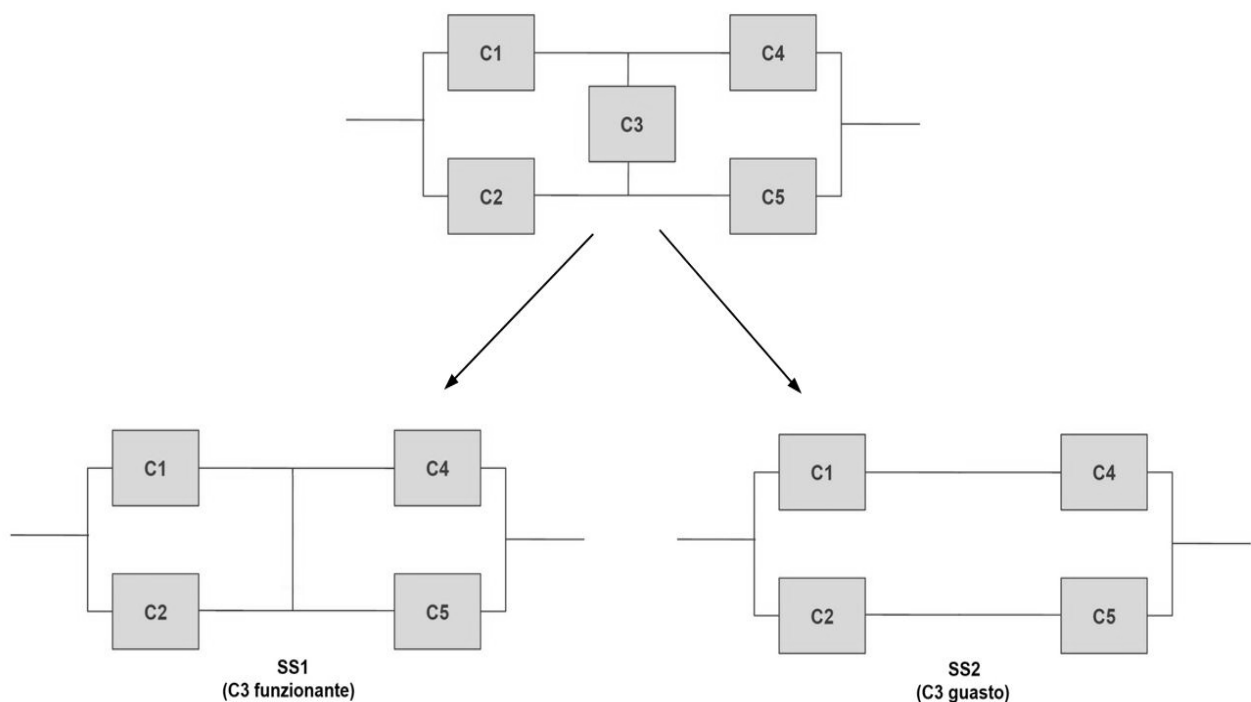


Figura 2.10: risoluzione dello schema bridge attraverso schemi equivalenti più semplici

A questo punto per calcolare l'affidabilità del sistema si possono applicare le classiche regole dei sistemi serie e parallelo e il metodo delle probabilità condizionate, come rappresentato dalla seguente relazione:

$$R_{SISTEMA}(t) = R_{SS1}(t) \cdot R_{C3}(t) + R_{SS2}(t) \cdot (1 - R_{C3}(t)) \quad (2.13)$$

Per risolvere sistemi ancora più complessi sono disponibili altre metodologie e modelli risolutivi, alcuni dei quali in grado di superare anche le limitazioni di applicabilità dell'approccio combinatorio in presenza di guasti stocasticamente dipendenti. Si segnalano, ad esempio, i *modelli Markoviani*, per i quali si rimanda alla specifica letteratura.

2.5.1 Ottimizzazione dell'affidabilità

L'affidabilità di un componente può essere valutata sia a posteriori attraverso analisi statistiche sia in fase di progettazione e sviluppo su componenti rappresentativi. Generalmente in questo secondo caso i costruttori realizzano apposite prove sperimentali in grado di simulare, in modo accelerato, le sollecitazioni alle quali sarà sottoposto il componente durante l'esercizio previsto.

Come abbiamo visto però per ottimizzare l'affidabilità di un sistema è opportuno agire su determinati componenti (ad esempio in un sistema serie sul componente più debole), pertanto risulta scorretto, sia sotto il profilo affidabilistico che economico, spendere le risorse per aumentare in modo indiscriminato l'affidabilità di tutti i componenti. Non sempre questi aspetti vengono ben applicati, in quanto non di rado si utilizzano inutilmente componenti molto costosi, la cui elevata affidabilità viene vanificata dalle scarse caratteristiche affidabilistiche di altri componenti facenti parte del sistema. Risulta quindi fondamentale, in fase di progettazione, individuare prima di tutto l'affidabilità complessiva che il sistema deve effettivamente garantire e poi selezionare opportunamente i componenti. Occorre però sottolineare che tale approccio, semplice concettualmente, non sempre risulta di facile applicazione, in quanto nella scelta degli elementi del sistema è anche necessario sottostare ai limiti imposti da norme prescrittive e dall'effettiva disponibilità sul mercato della componentistica avente le caratteristiche ottimali individuate a livello teorico. Inoltre è opportuno tenere sempre ben presente il rapporto costo/beneficio relativo all'incremento di affidabilità, in quanto il costo di un componente generalmente aumenta con il crescere dell'affidabilità, ma oltre un certo limite tale costo diventa proibitivo, senza che si abbia un sensibile aumento in termini affidabilistici e quindi senza un concreto beneficio apportato al sistema.

Ci sono poi tutti gli aspetti legati alla manutenzione dei componenti, aspetti che non sono di certo secondari e che interagiscono con quelli visti precedentemente. Infatti nella progettazione del sistema gli elementi devono essere valutati non solo per le prestazioni che sono in grado di fornire al momento della messa in servizio, ma anche per la capacità di mantenere nel tempo tali livelli prestazionali in relazione ai costi di manutenzione. Chiudono il cerchio tutta una serie di aspetti, assolutamente non trascurabili, come quelli relativi all'efficienza energetica, all'impatto ambientale e al *decommissioning* del sistema stesso.

2.5.2 SIL - Safety Integrity Level (IEC 61508:2010)

Nei sistemi elettrici ed elettronici impiegati per svolgere funzioni di sicurezza è possibile esprimere sinteticamente l'affidabilità attraverso gli appositi livelli prestazionali codificati introdotti dalla norma IEC 61508 [B23], tali livelli, definiti SIL (Safety Integrity Level), sono individuati in relazione ai valori di PDF (Probability of Failure on Demand) e di PFH (Probability of Failure per Hour). I valori di PDF sono relativi ai componenti che operano su chiamata, mentre quelli di PFH si riferiscono ai componenti a funzionamento continuo. Uno degli obiettivi principali della IEC 61508 è facilitare lo sviluppo di norme di prodotto e di applicazione nel settore dei sistemi elettrici, elettronici ed elettronici programmabili di sicurezza (E/E/EP). La norma non si applica quando il sistema possiede caratteristiche intrinseche che soddisfano già gli aspetti di rischio tollerabile, oppure quando è richiesto un livello di integrità di sicurezza inferiore al livello 1, che risulta essere il minimo considerato dalla norma stessa. La IEC 61508 è articolata in 7 sezioni, ognuna delle quali si occupa di uno specifico aspetto del processo relativo alla sicurezza funzionale dei sistemi E/E/EP; la seguente figura 2.11, redatta secondo quanto riportato nel documento normativo parte 1, illustra le sezioni che compongono la serie IEC 61508.

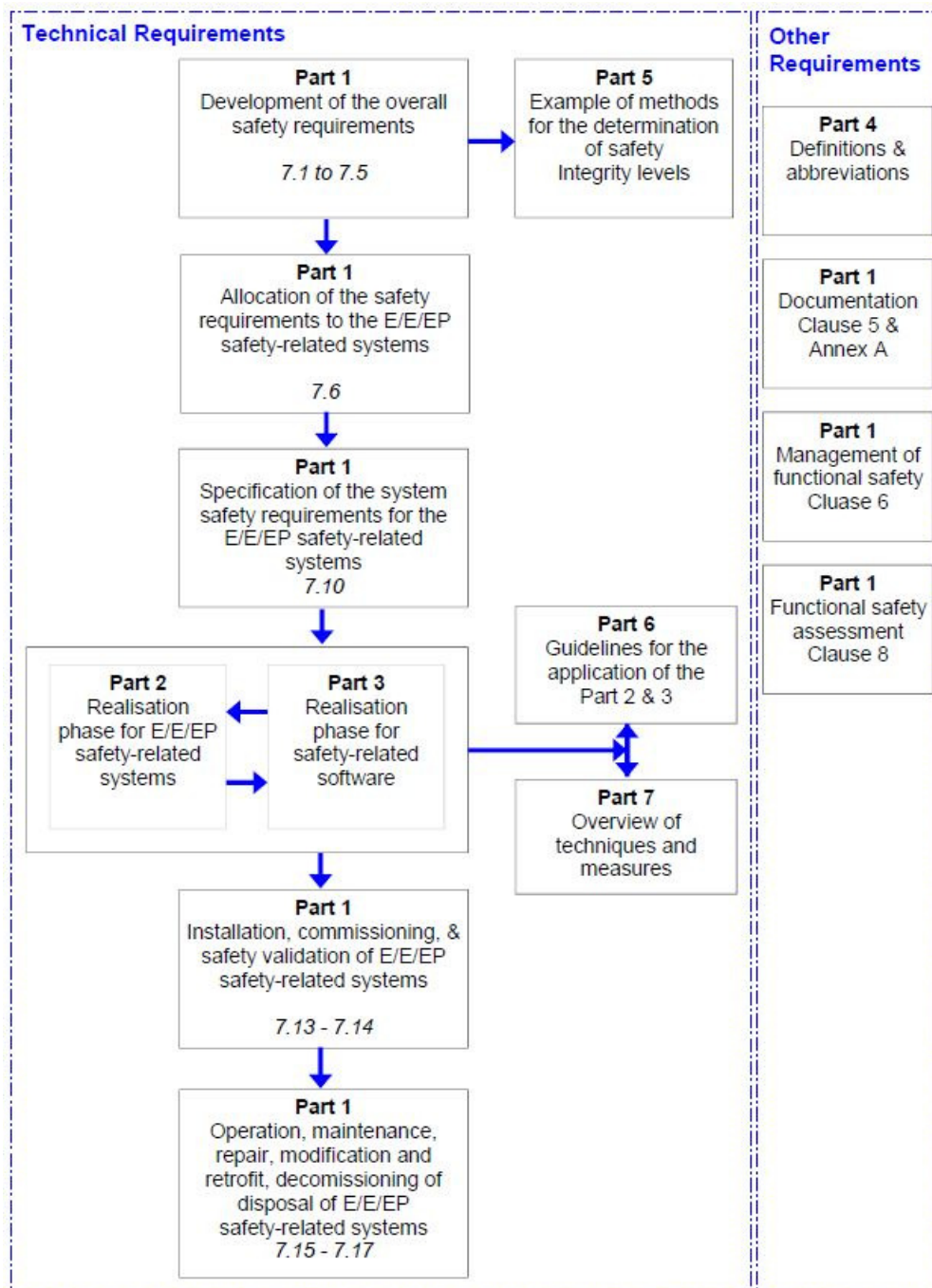


Figura 2.11: quadro generale della serie IEC 61508 [B23]

Come si è detto la norma IEC 61508 fornisce per ogni livello prestazionale (SIL) dei valori di probabilità di guasto, ad esempio, nel caso di componenti che operano su chiamata, il SIL 4 è applicabile ad un PDF (Probability of Failure on Demand) compreso nel seguente range: $\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$.

Per ulteriori approfondimenti sulla determinazione dei livelli di integrità di sicurezza si rimanda alla norma IEC 61508, ma si precisa che il SIL rappresenta solo un indicatore dell'affidabilità del sistema e non certo un indicatore di sicurezza capace di esprimere il rischio caratteristico del sistema stesso, in quanto non contiene valutazioni sulle conseguenze in caso di malfunzionamento.

2.6 Valutazione del rischio

Come abbiamo visto la configurazione di un sistema può evolvere verso condizioni di funzionamento degradato o di guasto che in alcuni casi possono risultare pericolose e generare conseguenze dannose a persone o cose.

Nelle gallerie stradali l'analisi e la gestione delle configurazioni che possono essere assunte da un sistema sono particolarmente importanti, sia per i sistemi di sicurezza che per quelli definibili ordinari, in quanto facilmente il malfunzionamento di un sistema di galleria comporta un significativo aumento del rischio connesso con l'utilizzo di questa particolare infrastruttura stradale.

La sicurezza in galleria, come riportato nel capitolo precedente, è stata oggetto in questi ultimi anni di specifiche Direttive e documenti tecnici, nei quali emerge una tendenza alla progettazione integrata, finalizzata a raggiungere obiettivi prestazionali che generalmente consentono di superare le caratteristiche di sicurezza individuate nelle indicazioni prescrittive.

Per poter valutare la sicurezza offerta da un sistema è necessario spingersi sino alla valutazione dei rischi, pertanto le stime di affidabilità non sono sufficienti a completare le analisi di sicurezza. In generale la valutazione del rischio connesso con un sistema è un processo sistematico che può seguire un approccio qualitativo, quantitativo oppure misto. In ogni caso i principali punti che descrivono la procedura sono i seguenti:

- inquadramento e definizione del sistema;
- individuazione dei pericoli (ad esempio per funzionamenti degradati, guasti, effetti fisico-chimici, errori umani, condizioni ambientali ed operative);
- determinazione dei possibili scenari incidentali che possono portare a conseguenze dannose per persone, cose e ambiente;
- stima delle frequenze di accadimento dei possibili incidenti;
- stima delle conseguenze relative ai vari scenari incidentali individuati;
- verifica dell'accettabilità del rischio, quindi del livello di sicurezza offerto dal sistema;
- eventuale implementazione di sistemi e interventi atti a ridurre il rischio

Indipendentemente dall'approccio utilizzato (qualitativo o quantitativo), l'analisi del rischio deve sempre contenere riscontri documentali chiari in merito ai dati di ingresso e alle metodologie di analisi utilizzate. Le valutazioni di accettabilità devono riportare i riferimenti e i criteri adottati per giungere alle relative conclusioni.

E' opportuno che il livello di dettaglio di ogni processo valutativo sia adeguato al rischio analizzato, in modo da non perseguire inutilmente aspetti banali di poco conto, non in grado di influenzare in modo significativo gli scenari incidentali.

In considerazione dei limiti di incertezza caratteristici di un processo di valutazione probabilistico è opportuno comunque adottare un certo livello di cautela nel suo utilizzo, in particolare nell'assunzione di decisioni strategiche in assenza di altri parametri valutativi di supporto, soprattutto se si ravvisano incertezze sui dati di ingresso o sulla solidità dell'approccio valutativo adottato.

In generale un approccio di valutazione del rischio di tipo qualitativo viene utilizzato quando non sono disponibili dati statistici o sperimentali idonei a supportare un approccio di tipo quantitativo e, in generale, quando il rischio interessa un numero modesto di persone. L'approccio qualitativo trova applicazione anche nelle valutazioni preliminari, al fine di individuare quali rischi devono essere sottoposti ad ulteriori approfondimenti, anche di tipo quantitativo. Una valutazione quantitativa viene invece richiesta quando è necessario analizzare gli eventi casuali al fine di valutare e gestire il rischio in modo sistematico, come nel caso delle attività a rischio di incidente rilevante, dove gli scenari incidentali sono caratterizzati da conseguenze gravi o catastrofiche.

In ogni processo di analisi e valutazione è comunque opportuno motivare le scelte ed evidenziare ogni aspetto critico, in particolare in merito alle variabili, agli indicatori di rischio, ai criteri di accettabilità e ai metodi di verifica utilizzati, in modo da rendere l'intero processo trasparente e quindi giudicabile.

Un'ampia visione delle tecniche e metodologie di analisi del rischio utilizzabili è fornita dalla norma EN 31010 [B13], alla quale si rimanda per gli opportuni approfondimenti.

Si ricorda che nell'ambito delle gallerie stradali, come si è visto nel capitolo precedente, il D. Lgs. n. 264/2006 richiede espressamente di adottare un approccio quantitativo per valutare la sicurezza delle gallerie transeuropee di lunghezza superiore a 500 metri, nel caso queste non presentino i requisiti minimi di sicurezza previsti dal Decreto stesso. Si ritiene però opportuno integrare l'analisi di rischio quantitativa (QRA) con valutazioni qualitative d'insieme, in modo da ottenere la conferma dei risultati anche da un punto di vista qualitativo olistico.

2.6.1 Metodi qualitativi

Le tecniche di analisi che fanno ricorso ad un approccio di tipo qualitativo sono di fatto processi decisionali soggettivi e quindi possono essere semplicemente definite come metodologie ordinate basate sul giudizio esperto del valutatore. Come è noto i vantaggi offerti da tali metodi, come ad esempio la semplicità e la possibilità di operare con pochi dati, si scontrano con le criticità tipiche di ogni assunzione affetta da aspetti soggettivi. Le tecniche qualitative, oltre al diffuso utilizzo nelle valutazioni di rischio semplici o con disponibilità limitata di dati, sono indicate, e spesso risultano indispensabili, nelle fasi preliminari di analisi più approfondite e complesse, in particolare per individuare i pericoli e fornire una loro prima caratterizzazione, in modo da permettere un'appropriata calibrazione del livello di dettaglio delle successive fasi di analisi e valutazione di tipo quantitativo.

Come è noto sono disponibili diverse tecniche di analisi basate su approcci qualitativi, tra queste si evidenziano alcune di uso comune che trovano particolare utilità nelle fasi preparatorie di analisi quantitative.

What-if analysis

La metodologia consiste essenzialmente in sessioni di *brainstorming* basate sulla tipica domanda: cosa accade se...? Si tratta di una tecnica molto semplice, facile da gestire, utilizzata per studiare le relazioni causa-effetto e poter selezionare quelle di interesse, come ad esempio quelle che portano a stati di non conformità dell'elemento o del sistema, in particolare se ritenuti pericolosi.

Hazard Analysis & Operability (HAZOP)

Si tratta di una tecnica strutturata per l'analisi di un sistema o di un processo e per la gestione dei relativi rischi. L'HAZOP mira all'individuazione dei pericoli esistenti, i quali vengono identificati e indagati sulla base di deviazioni di parametri caratteristici del processo in esame. L'analisi prevede un'opportuna fase di definizione delle condizioni ambientali e delle conoscenze dei processi, seguita da una disamina dei parametri caratteristici, delle loro deviazioni e delle relative conseguenze, sino a giungere a conclusioni e raccomandazioni in merito alla gestione del sistema stesso. L'analisi è generalmente portata avanti da un team di lavoro ed è caratterizzata da un alternarsi di domande e risposte basate su parole chiave, le domande hanno lo scopo di sollecitare la discussione del gruppo sui modi in cui il funzionamento del sistema o di un suo componente potrebbe discostarsi dai parametri funzionali e di sicurezza previsti. La tecnica prevede la presenza di un soggetto coordinatore e di soggetti esperti adeguatamente supportati dalla documentazione sul sistema da analizzare (schede tecniche, schemi, planimetrie, diagrammi funzionali, ecc.). Il metodo di analisi viene descritto nel dettaglio dalla norma IEC 61882 [B31], alla quale si rimanda per una completa comprensione.

Il successo applicativo di un'analisi HAZOP, come in genere avviene nella maggior parte delle tecniche qualitative, è strettamente legato alla completezza dei dati utilizzati e alle conoscenze tecniche e abilità del team di operatori.

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA)

La metodologia di analisi FMEA ha lo scopo di identificare le modalità di guasto di un sistema, stabilire e analizzare le relative cause, nonché valutare gli effetti sul

funzionamento e in generale sulle prestazioni del sistema in esame. La metodologia prevede di individuare anche gli interventi migliorativi più opportuni. Questa tecnica ha subito un'evoluzione ed è stata affiancata, e di fatto sostituita, dalla metodologia FMECA, la quale include un percorso di analisi per valutare anche il livello di criticità degli inconvenienti individuati. La valutazione prevede l'attribuzione di un indice di rischio, denominato RPN (Risk Priority Number), il quale viene ottenuto attraverso il prodotto di più fattori, generalmente si fa riferimento alla gravità delle conseguenze, alla probabilità dell'evento e alla sua rilevabilità. Attraverso l'RPN è poi possibile definire la tipologia e la priorità degli interventi per la riduzione del rischio connesso con il sistema in esame. La tecnica FMECA, a seconda di come vengono stimati i fattori che compongono l'RPN, può assumere le caratteristiche di una valutazione qualitativa o semiquantitativa. Per valutazioni quantitative generalmente si utilizzano altre tecniche, in ogni caso l'FMEA o l'FMECA risultano utili nelle fasi preliminari di valutazioni più complesse, in particolare negli studi iniziali su componenti e sistemi che devono possedere caratteristiche *fail safe*. In considerazione del fatto che il progetto sviluppato in questa ricerca deve fornire funzioni di sicurezza e presenta significativi aspetti innovativi, tali metodologie di analisi si sono rilevate utili in diverse scelte progettuali.

2.6.2 Approccio quantitativo

Le tecniche di *Risk Analysis*, finalizzate ad analizzare le cause o le configurazioni di guasto che possono portare ad un incidente e le configurazioni evolute post incidente che possono portare a conseguenze negative per persone o cose, generalmente vengono rappresentate graficamente con il cosiddetto evento iniziatore o incidente (EI) come punto nodale tra le cause e gli eventi conseguenti. Un esempio di questa rappresentazione logico sequenziale del flusso del pericolo è illustrata nella figura 2.12, tratta da un articolo del 2009 di Guarascio. M. et al. [C3], tale rappresentazione viene definita *Bow-Tie model*.

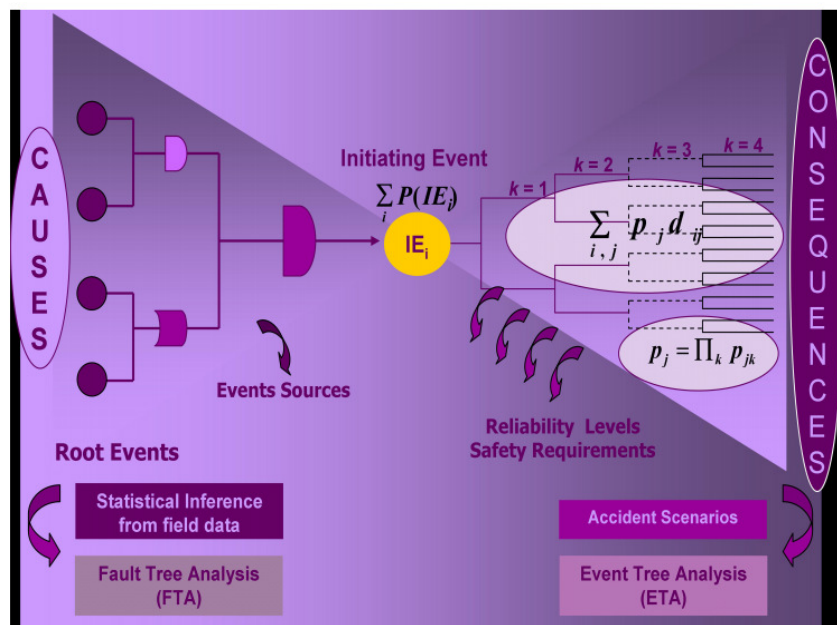


Figura 2.12: rappresentazione grafica del flusso del pericolo con Bow-Tie model [C3]

L'esempio grafico di figura 2.12 risulta elettivo per rappresentare tecniche di analisi quantitative, in particolare per l'Analisi del Rischio Quantitativa Probabilizzata (ARQP). Questa tecnica, basata su un approccio probabilistico, generalmente prevede l'utilizzo di un albero dei guasti o delle cause (*Fault Tree Analysis - FTA*) e di un albero degli eventi (*Event Tree Analysis - ETA*). L'albero delle cause viene realizzato destrutturando l'evento iniziatore sino ad arrivare alle cause primarie, ovvero a cause origine che non meritano ulteriori semplificazioni. La destrutturazione si realizza attraverso l'uso di opportuni operatori logici; si utilizza la funzione OR quando il verificarsi di un determinato evento in uscita dalla porta è subordinato al verificarsi di una o più cause in ingresso, mentre si utilizza la funzione AND quando per avere l'evento in uscita è necessario che si verifichino tutte le cause in ingresso. L'albero delle cause viene definito anche albero dei guasti, in quanto molto spesso si utilizza per studiare l'evoluzione dei guasti di un sistema.

Una volta che l'evento iniziatore si realizza le condizioni di danno verso persone o cose sono fortemente dipendenti dalla tipologia dell'incidente e dalle condizioni al contorno. Se ad esempio ci riferiamo ad un incendio in galleria, sarà necessario considerare la termofluidodinamica del fenomeno, i sistemi di mitigazione, le condizioni di affollamento, le capacità di autosoccorso e tutta una serie di aspetti inerenti l'intervento delle squadre di soccorso. L'analisi dei possibili scenari incidentali che seguono

l'evento iniziatore viene generalmente sviluppata attraverso la realizzazione dell'albero degli eventi (ETA). L'immagine seguente (figura 2.13) raffigura un esempio di albero degli eventi relativo ad un incendio in galleria; si tratta di una struttura molto semplificata che considera solo alcuni aspetti relativi al funzionamento dei sottosistemi atti a supportare l'esodo. Nell'albero sono stati assunti, per le probabilità degli eventi associati alle biforcazioni dei singoli rami, valori *rappresentativi*, cioè riferibili a stime *razionali verosimili*, basate su tecniche di giudizio esperto, mentre i valori riferiti all'efficacia dell'autosoccorso sono semplicemente indicativi, al fine di evidenziare il contributo offerto da un sistema di navigazione indoor di galleria come quello proposto in questa ricerca. Una stima sufficientemente attendibile del numero di vittime necessita opportune simulazioni delle condizioni termofluidodinamiche dell'incendio e delle conseguenti condizioni in cui si realizza l'esodo degli esposti (autosoccorso).

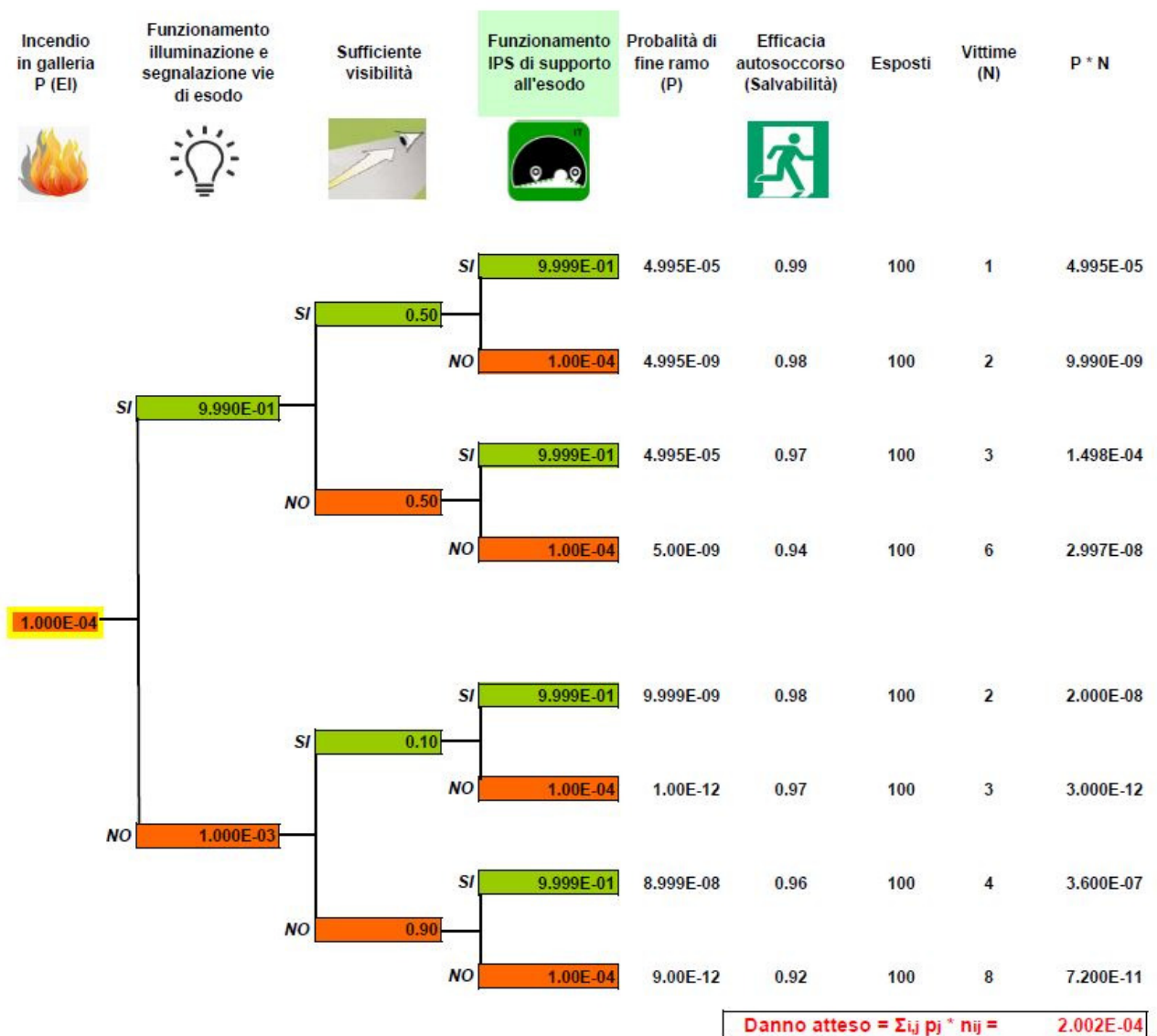


Figura 2.13: esempio di Event Tree Analysis

3.0 CAPITOLO III - Il comportamento umano in condizioni di emergenza

Per anni le normative di sicurezza, le procedure di soccorso e autosoccorso, nonché i sistemi di emergenza, sono stati sviluppati occupandosi principalmente di aspetti tecnici, senza dare la dovuta importanza ad un aspetto in grado di mandare a rotoli deduzioni fisico-chimiche e complessi calcoli matematici: il comportamento umano.

Oggi le cose sono cambiate e il cosiddetto *Fattore Umano*, con la consapevolezza della sua imprevedibilità, è tenuto in forte considerazione in ogni buona valutazione del rischio. Sono infatti numerosi i metodi e le tecniche disponibili per tentare di stimare in che modo, e con che probabilità, il comportamento di un certo individuo, o di un gruppo di persone, possa influenzare l'evolversi degli eventi, in particolare quando si è chiamati a trattare scenari incidentali di significativa rilevanza. Ciò nonostante, proprio a causa della difficoltà di modellazione, il fattore umano rappresenta ancora l'anello debole che spesso vanifica gli sforzi e quindi la solidità di una meticolosa valutazione di sicurezza.

Premesso che il comportamento delle persone in condizioni di emergenza è un argomento vasto, complesso e ampiamente trattato in letteratura, si riportano, per completezza, solo alcuni aspetti e considerazioni di interesse per il presente progetto di ricerca.

3.1 Le reazioni umane e l'esodo di emergenza

Le singole persone in risposta ad una situazione di emergenza assumono comportamenti spesso imprevedibili, la reazione dipende infatti da numerosi fattori interni ed esterni all'individuo stesso, tra cui la capacità di rilevare una determinata fonte di pericolo, la percezione soggettiva del rischio, la reazione emotiva, le condizioni ambientali e il comportamento assunto dalle altre persone. La reazione dipende inoltre dalle caratteristiche proprie dell'individuo, come ad esempio il genere, l'età e lo stato di salute, nonché il suo bagaglio culturale e in generale le sue capacità cognitive. La complessità dei fenomeni in gioco è tale da non consentire l'individuazione di regole generali per il comportamento individuale e tantomeno per quello di un gruppo di persone o di una folla. A proposito di folla in fuga, questa veniva considerata, non

troppo tempo fa, come un fluido in movimento, in grado di sfruttare tutte le aperture presenti nell'ambiente per evadere, ma purtroppo tale approccio idraulico, privo di dati psicologici e sociali sul comportamento umano, si è rivelato fornire modelli comportamentali troppo distanti dai possibili scenari che possono realmente accadere durante l'evolversi di un esodo di emergenza. La folla infatti è costituita da singoli individui, i quali pensano, interagiscono, prendono decisioni, si agitano e cadono, inoltre le persone possono avere comportamenti individualistici o gregari nella ricerca di una via di uscita per salvarsi.

La risposta ad un segnale di pericolo, soprattutto se questo è auto percepito (come generalmente avviene in una galleria stradale), non è immediata, in quanto le persone tendono, nella maggior parte dei casi, a voler definire la situazione prima d'intraprendere un'azione, in pratica attendono una conferma. Nelle prime fasi si ha infatti il cosiddetto fenomeno del *milling*, ovvero del girovagare come un mulino, dove l'individuo cerca conferme dall'ambiente e dalle altre persone. Dopo tale inerzia decisionale possono instaurarsi anche comportamenti gregari controproducenti, come ad esempio quelli che portano a seguire un individuo che ha intrapreso un percorso del tutto errato o non ottimale. Questi comportamenti sono spesso causa di pesanti conseguenze, in particolare quando l'emergenza da fronteggiare presenta una rapida evoluzione, come avviene nel caso di un incendio.

Di seguito un tipico esempio grafico (figura 3.1) di pericolosi comportamenti gregari in caso di incendio.

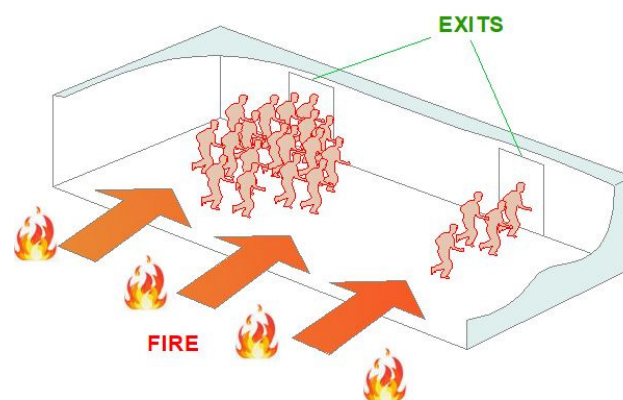


Figura 3.1: esempio di tipici comportamenti gregari in caso di incendio

Secondo gli studi di Leach (2004) [C9] la risposta delle persone nelle situazioni di pericolo possono essere distinte in tre gruppi:

- il primo gruppo, composto da circa il 10-15% delle persone coinvolte in un disastro, rimane pressoché calmo. Questi individui sono in grado di elaborare con consapevolezza la situazione e riescono a mettere in atto un piano di azione;
- il secondo gruppo, circa il 75% delle persone, è formato da coloro che rispondono alla situazione in maniera sconcertata e confusa. Queste persone presentano un ragionamento compromesso e un comportamento governato da processi pressoché automatici;
- il terzo gruppo, circa il 10-15% delle persone, è composto invece da coloro che assumono comportamenti controproducenti. Queste persone, che aumentano il rischio di morte, sono prese da confusione totale, piangono, urlano o rimangono paralizzate dall'ansia.

Risulta evidente che nel 2° e nel 3° gruppo si registra il numero maggiore di vittime. In pratica la maggior parte delle persone in condizioni di emergenza presentano un comportamento non adeguato a fronteggiare al meglio la situazione.

Le reazioni degli individui al pericolo possono essere davvero molto diverse, di seguito si riportano alcuni tipici esempi:

- comportamenti disorganizzati, con persone che corrono in più direzioni;
- comportamenti ansiosi, con persone che urlano, piangono, si disperano, incapaci di compiere anche semplici azioni;
- comportamenti definibili di panico;
- comportamenti di congelamento (le persone rimangono praticamente bloccate, incapaci di muoversi);
- comportamenti di attaccamento ai beni personali, che portano le persone a ritardare l'abbandono del luogo pericoloso, nell'intento di recuperare prima i loro oggetti di valore economico o affettivo;
- comportamenti di altruismo, con persone che cercano di aiutare gli altri, esponendosi loro stessi al pericolo di morte;

- comportamenti di coesione e interazione (le persone si riuniscono in gruppi);
- comportamenti razionali (purtroppo registrati solo in minima parte), che consentono di prendere decisioni corrette e attuare azioni di autosoccorso coerenti con l'emergenza in atto.

In generale, tra i vari aspetti che influenzano l'efficacia di una evacuazione, diversi studi, tra cui quello di Marsella e Sciarretta (2016) [C11], evidenziano quattro macro fattori che interagiscono tra loro. Di seguito, in figura 3.2, si riporta una rappresentazione schematica.

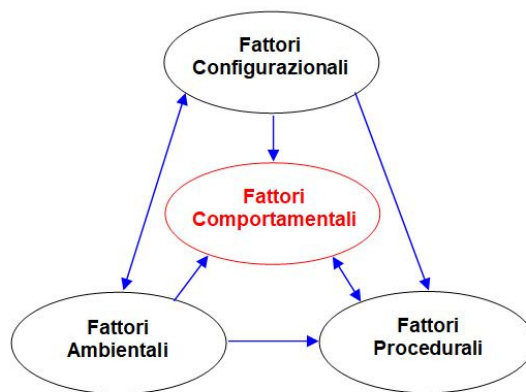


Figura 3.2: principali fattori che interagiscono e regolano l'efficacia di una evacuazione

Per *fattori configurazionali* si intendono quelli inerenti la struttura architettonica dell'edificio o dell'ambiente (numero di uscite, percorsi di esodo, ecc.). I *fattori ambientali* sono invece quelli che possono procurare alle persone effetti debilitanti, come ad esempio il calore, i gas tossici e i fumi densi che riducono la visibilità. Ci sono poi i *fattori procedurali* che comprendono le conoscenze e le informazioni acquisite dalle persone (segnaletica, messaggi, informazioni fornite dal personale, ecc.). Ed infine, ma molto importanti, ci sono i *fattori comportamentali*, relativi appunto al comportamento delle persone durante le emergenze (reazioni iniziali, decisioni, interazioni con il gruppo, ecc.).

Ci troviamo quindi di fronte a dover fronteggiare scenari molto diversi con un elevato indice di variabilità nel tempo, in particolare per le diverse reazioni delle persone coinvolte. Un buon metodo preventivo per ridurre i comportamenti errati ed imprevisti è

senz'altro quello della formazione delle persone con prove simulate di evacuazione, ma questa importante attività risulta di fatto possibile solo con il personale di un'azienda, nell'ambito della formazione per la sicurezza sul lavoro. In ogni caso risulta evidente l'opportunità di sviluppare e valutare l'efficacia di nuovi sistemi tecnologici in grado di supportare l'autosoccorso, al fine di guidare le azioni delle persone e quindi abbattere significativamente il rischio relativo all'imprevedibilità del comportamento umano. Come vedremo il nostro progetto di ricerca, incentrato sulla localizzazione dell'utente in galleria e sul supporto all'esodo, persegue tali finalità.

3.2 Simulatori e modelli del movimento umano

Nonostante i numerosi fattori in gioco e le difficoltà di prevedere il comportamento umano, oggi sono disponibili interessanti modelli e simulatori software che ci aiutano nel gravoso compito di dover modellare il movimento delle persone in scenari di evacuazione. In pratica, con opportuni dati di ingresso e con un sapiente utilizzo di questi applicativi, è possibile contenere gli errori di stima dovuti al comportamento umano in determinate condizioni di emergenza. Ad esempio, nell'ambito della progettazione antincendio, l'evacuazione può essere studiata con diversi software o codici di simulazione; tra i più comuni troviamo FDS+Evac, Pathfinder, Simulex e STEPS. A titolo di esempio si riportano brevemente solo alcuni aspetti relativi al simulatore gratuito FDS+Evac [F11]. Come è noto si tratta di un software sviluppato dal NIST (National Institute of Standards and Technology - United States), in collaborazione con il VTT (Technical Research Centre of Finland). Si tratta in realtà di un modello di simulazione di evacuazione (Evac), integrato in un modello per la simulazione dell'incendio (FDS- Fire Dynamic Simulation). Tale software permette di simulare contemporaneamente l'incendio e l'evacuazione; in pratica, usando FDS come piattaforma di calcolo degli effetti dell'incendio, si forniscono ad EVAC i parametri ambientali puntuali (es. densità dei fumi e concentrazione dei gas tossici) necessari per modellare il comportamento degli esseri umani durante l'esodo. L'approccio risulta valido, in quanto gli effetti dell'incendio influenzano fortemente il comportamento umano e quindi l'evolversi dell'esodo; in ogni caso è possibile simulare anche solo l'evacuazione senza la presenza dell'incendio.

Per poter simulare il movimento umano il modello EVAC considera ogni individuo come un agente autonomo, sottoposto alle forze che si generano realmente in una folla. In pratica il movimento di ogni persona viene espresso da un'equazione di moto, sviluppata in un dominio matematico continuo nello spazio, che tiene conto di diverse forze (di contatto, di attrito e psicologiche) che si generano tra i vari soggetti, nonché tra questi e le pareti o gli ostacoli.

Ogni persona o agente è approssimata con la sovrapposizione di tre cerchi, come rappresentato nella figura 3.3, tratta dal manuale EVAC.

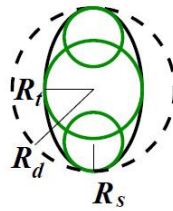


Figura 3.3: rappresentazione della forma umana in EVAC [F11]

La tabella 3.1, anch'essa tratta dal manuale Evac, riporta le dimensioni del corpo e la velocità del movimento delle persone in assenza di impedimenti.

Body type	R_d (m)	R_t/R_d (-)	R_s/R_d (-)	d_s/R_d (-)	Speed (m/s)
Adult	0.255 ± 0.035	0.5882	0.3725	0.6275	1.25 ± 0.30
Male	0.270 ± 0.020	0.5926	0.3704	0.6296	1.35 ± 0.20
Female	0.240 ± 0.020	0.5833	0.3750	0.6250	1.15 ± 0.20
Child	0.210 ± 0.015	0.5714	0.3333	0.6667	0.90 ± 0.30
Elderly	0.250 ± 0.020	0.6000	0.3600	0.6400	0.80 ± 0.30

Tabella 3.1: dimensioni del corpo umano e velocità del movimento [F11]

L'equazione di moto, tratta dal manuale EVAC, è la seguente:

$$m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = f_i(t) + \xi_i(t) \quad (3.1)$$

dove:

$x_i(t)$ è la posizione dell'agente i-esimo al tempo t ;

$f_i(t)$ è la forza esercitata sull'agente dall'ambiente circostante;

m_i è la massa;

$\xi_i(t)$ è una piccola forza di fluttuazione casuale.

In riferimento alla (3.1), la velocità degli agenti è data da:

$$v_i(t) = \frac{dx_i}{dt} \quad (3.2)$$

L'algoritmo del moto è basato sul modello di Helbing con le variazioni introdotte da Langston. Al fine di simulare il movimento delle persone in modo realistico, la forza esercitata sull'agente i -esimo è formata da diversi componenti, i quali tengono conto sia di aspetti fisici (collisioni, attriti, ecc.) che di aspetti psicologici, come ad esempio quelli relativi alle distanze che le persone tendono a mantenere nei confronti di altri individui e delle pareti dell'ambiente (definite in Evac *forze sociali*). Di seguito (figura 3.4) si riporta la rappresentazione grafica, tratta dal manuale EVAC, del concetto di *forza sociale*.

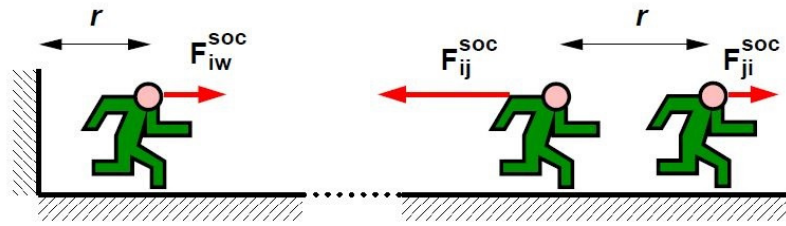


Figura 3.4: rappresentazione del concetto di forza sociale, secondo il modello EVAC [F11]

Un altro aspetto che troviamo in FDS+Evac è la selezione delle vie di uscita da parte dell'agente. In pratica la selezione è modellata come un problema di ottimizzazione, nel quale viene selezionata l'uscita che minimizza il tempo di evacuazione. Il processo decisionale è però influenzato dalla visibilità, dalla familiarità con il percorso e dalla presenza di disturbi dovuti agli effetti dell'incendio. L'algoritmo prevede prima l'individuazione delle uscite in gruppi di preferenza (tabella 3.2) e poi la selezione dell'uscita che minimizza il tempo di evacuazione fra le uscite del gruppo predeterminato. L'algoritmo decisionale è stato però modificato con gli aggiornamenti del software, infatti a partire dalla versione 2.3.0, viene assegnata la preferenza alle uscite libere dal fumo, attivandole all'interno dei gruppi di appartenenza, indipendentemente dal fattore familiarità.

Preference	Visible	Familiar	Disturbing conditions	
1	yes	yes	no	black
2	no	yes	no	yellow
3	yes	no	no	blue
4a	yes	yes	yes	red
4b	no	yes	yes	green
4c	yes	no	yes	magenta
No preference	no	no	no	cyan
No preference	no	no	yes	cyan

Tabella 3.2: dimensioni del corpo umano e velocità del movimento [F11]

Le ultime due righe della tabella non forniscono preferenze, in quanto gli agenti non sono consapevoli della presenza di uscite non visibili e sconosciute. L'ultima colonna invece mostra i colori utilizzati nel software Smokeview, il quale consente di visualizzare, anche in 3D, le previsioni numeriche generate da modelli CFD (Computational Fluid Dynamics), come appunto FDS (Fire Dynamics Simulator).

Si precisa che sono state riportate solo alcune informazioni sul simulatore FDS+Evac, pertanto per una completa comprensione si rimanda alla documentazione ufficiale reperibile al seguente indirizzo web:

http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/fdsevac/documents/FDS+Evac_textbased_homepage.txt

FDS+Evac e gli altri applicativi simili sono molto utilizzati e apprezzati nell'ambito degli esperti antincendio, in particolare a livello universitario, ciò nonostante l'imprevedibilità del comportamento umano rimane l'anello debole, in grado di influenzare fortemente l'affidabilità dei risultati ottenuti nella simulazione del processo di evacuazione. Tale criticità possono essere inoltre amplificate dalle scelte soggettive effettuate dal valutatore stesso sui dati di ingresso utilizzati. In accordo con uno studio di Ronchi del 2013 [C12], il quale prende in esame diversi simulatori (FDS+Evac, Pathfinder, Simulex e STEPS), si ritiene necessario un grande sforzo di ricerca sperimentale per individuare modelli di comportamento umano più affidabili e completi, in grado di fornire al valutatore una base di partenza più solida (modelli di comportamento sociale evoluti, influenza del fumo e della temperatura sulla velocità della camminata, modelli d'individuazione del percorso di esodo, ecc.).

Al riguardo delle simulazioni di esodo, si coglie l'occasione per sottolineare come tali attività sperimentali siano necessarie anche per poter valutare sul campo la risposta

umana al sistema di localizzazione di galleria proposto nella presente ricerca. Le simulazioni saranno infatti indispensabili per valutare, sia l'effettivo beneficio in termini di riduzione del rischio, sia le difficoltà di utilizzo in condizioni di emergenza simulata.

3.3 L'importanza dei sistemi tecnologici nel supporto all'autosoccorso

Risulta ormai consolidata, pressoché in ogni ambito, l'importanza della tecnologia nella sicurezza delle persone, sia a livello di prevenzione che di riduzione del danno. Basti ad esempio pensare ai numerosi sistemi di sicurezza attiva e passiva presenti in una moderna autovettura, oppure a quelli installati in un veicolo a guida autonoma. Grazie alla tecnologia applicata alla sicurezza, siamo riusciti a ridurre drasticamente il rischio associato a molteplici attività umane, con risultati concreti in termini di vite salvate. Come è noto, tra i numerosi sistemi preposti alla sicurezza, quelli dedicati all'autosoccorso, come ad esempio l'illuminazione e la segnalazione delle vie di esodo, oppure le indicazioni sonore di evacuazione (EVAC), ricoprono una funzione rilevante e strategica per poter ottenere scenari incidentali deviati verso conseguenze decisamente meno gravi.

Volendo però soffermarsi brevemente su quanto sia impegnativo progettare e implementare un nuovo sistema di sicurezza, si ritiene doveroso evidenziare che le difficoltà con le quali bisogna scontrarsi non si esauriscono solo con l'individuazione delle soluzioni tecniche e con l'ottenimento e il mantenimento nel tempo dei necessari livelli di affidabilità di funzionamento, ma spesso occorre fare i conti con aspetti che possono sfociare in un ambito definibile etico. In pratica, occorre essere sufficientemente sicuri che il sistema porti significativi vantaggi in termini di riduzione del rischio e nel contempo è necessario valutare l'accettabilità, anche morale, di nuovi rischi eventualmente introdotti dal sistema stesso. Si tratta di aspetti importanti e delicati che generalmente vengono affrontati attraverso un'adeguata valutazione comparativa del rischio, così come avviene ad esempio nell'ambito farmacologico per valutare i pro e i contro relativi all'assunzione di un determinato farmaco. Tali aspetti assumono particolare rilevanza quando le variabili in gioco sono numerose e di difficile modellazione, come avviene purtroppo in ambito ingegneristico nella gestione delle emergenze e in particolar modo al riguardo dell'autosoccorso in condizioni d'incendio.

Prendiamo ad esempio il caso di nostro interesse, ovvero un incendio in galleria che necessiti di abbandonare l'infrastruttura; in tali condizioni risulta evidente che l'illuminazione di sicurezza e la segnalazione delle uscite di emergenza rappresentano due sistemi tecnologici di sicura riduzione del rischio, privi di controindicazioni degne di nota. In modo analogo un sistema di localizzazione indoor affidabile consente di ottenere certamente un incremento della sicurezza in galleria, grazie alle puntuali informazioni (posizione e distanza delle uscite) fornite all'utente anche in condizioni di scarsa visibilità. Si ritiene invece delicata la valutazione comparativa del rischio connesso con la presenza o meno di un sistema in grado di fornire anche indicazioni perentorie circa il verso ottimale da seguire per abbandonare la galleria. In questo caso, così come descritto nel paragrafo 5.4.6, occorre valutare con molta attenzione se e quando fornire tali indicazioni, in pratica si ritiene necessario porre grande attenzione nello sviluppo e nella sperimentazione del solutore che dovrà sovrintendere la selezione del miglior percorso da proporre all'utente per abbandonare la galleria. Si evidenzia che tali aspetti dovranno essere affrontati in approfondimenti futuri e che nel presente elaborato il sistema di localizzazione di galleria sarà comunque sviluppato ad un livello tecnico prestazionale in grado di fornire all'utente anche il percorso di esodo da seguire.

Ritornando brevemente al comportamento umano, si ritiene che la presenza in galleria di un sistema di localizzazione, oltre a fornire un effettivo supporto all'esodo e in generale agli spostamenti a piedi in galleria, rappresenti per l'utente una tranquillità psicologica, che con buona probabilità può contribuire a ridurre i pericolosi fenomeni di ansia e panico, conseguenti ad un evento incidentale. In pratica si ritiene che il sistema proposto sia in grado di ridurre il rischio di galleria, sia ottimizzando il percorso di esodo, sia migliorando il comportamento umano in condizioni di emergenza.

4.0 CAPITOLO IV - Localizzazione e navigazione in ambienti chiusi

4.1 Introduzione all'indoor positioning

Come è noto il Global Positioning System (GPS) si è praticamente imposto come standard nei sistemi satellitari globali di navigazione (GNSS) e oggi questo sistema risulta sfruttabile da chiunque utilizzando un comune smartphone dotato di ricevitore GPS. Il Global Positioning System ha raggiunto da tempo una consolidata affidabilità in termini di funzionamento, accuratezza e precisione del posizionamento, ma purtroppo i segnali elettromagnetici provenienti dalla costellazione dei suoi satelliti non possono essere ricevuti correttamente all'interno di ambienti chiusi, pertanto negli edifici e, a maggior ragione, all'interno di gallerie il servizio di posizionamento in tempo reale del GPS, o di ogni altro sistema basato su segnali elettromagnetici provenienti dall'esterno dell'ambiente, cessa di funzionare.

Gli studi sulle possibili soluzioni in grado di realizzare un affidabile sistema di posizionamento indoor (IPS) da diversi anni interessano fortemente il mondo scientifico, in quanto la possibilità di disporre di un supporto all'orientamento anche in aree chiuse rappresenta una sentita esigenza, in particolare quando ci si deve spostare all'interno di strutture grandi e complesse. Gli ambiti dove l'indoor positioning può trovare utilità sono davvero numerosi e in continuo sviluppo; oggi le applicazioni più rilevanti si possono individuare nel campo del marketing e della fornitura di informazioni culturali, ma si stanno studiando e implementando applicazioni anche per guidare l'utente verso punti di interesse all'interno di aeroporti e luoghi pubblici, nonché per tracciare la posizione e i movimenti del personale e dei materiali in ambito industriale. Nel corso di questi ultimi anni, utilizzando diverse tecnologie, sono stati fatti notevoli progressi nel campo dell'IPS, ma non sempre i risultati possono essere considerati soddisfacenti, in particolare se si analizzano le prestazioni di questi sistemi in relazione all'utilizzo in applicazioni di sicurezza. Tali applicazioni, come vedremo, sono proprio quelle di nostro interesse, in quanto il presente studio ruota intorno allo sviluppo di un sistema di navigazione indoor, fruibile con un comune smartphone, atto a supportare l'esodo pedonale all'interno delle gallerie stradali e autostradali. La necessità

di utilizzare come dispositivo client uno smartphone, in modo da consentire una diffusione di utilizzo capillare, non rappresenta più un significativo problema, in quanto i moderni dispositivi presentano ormai elevate capacità di calcolo e di memoria, ma soprattutto dispongono di numerosi ricevitori e sensori integrati, i quali possono essere sfruttati in diverse tecnologie di indoor positioning. Tra i sensori presenti in un moderno smartphone si riportano quelli più rilevanti per studi e sviluppi nell'ambito IPS:

- ricevitori per le comunicazioni wireless (Bluetooth 4.0 e Wi-Fi 802.11);
- accelerometro a 3 assi;
- giroscopio;
- rilevatore di campo magnetico (bussola);
- rilevatore di segnali luminosi nel campo del visibile o dell'infrarosso (fotocamera);
- microfono.

La figura seguente illustra schematicamente le principali tecnologie oggi utilizzabili per ottenere sistemi più o meno validi di posizionamento in ambienti chiusi.

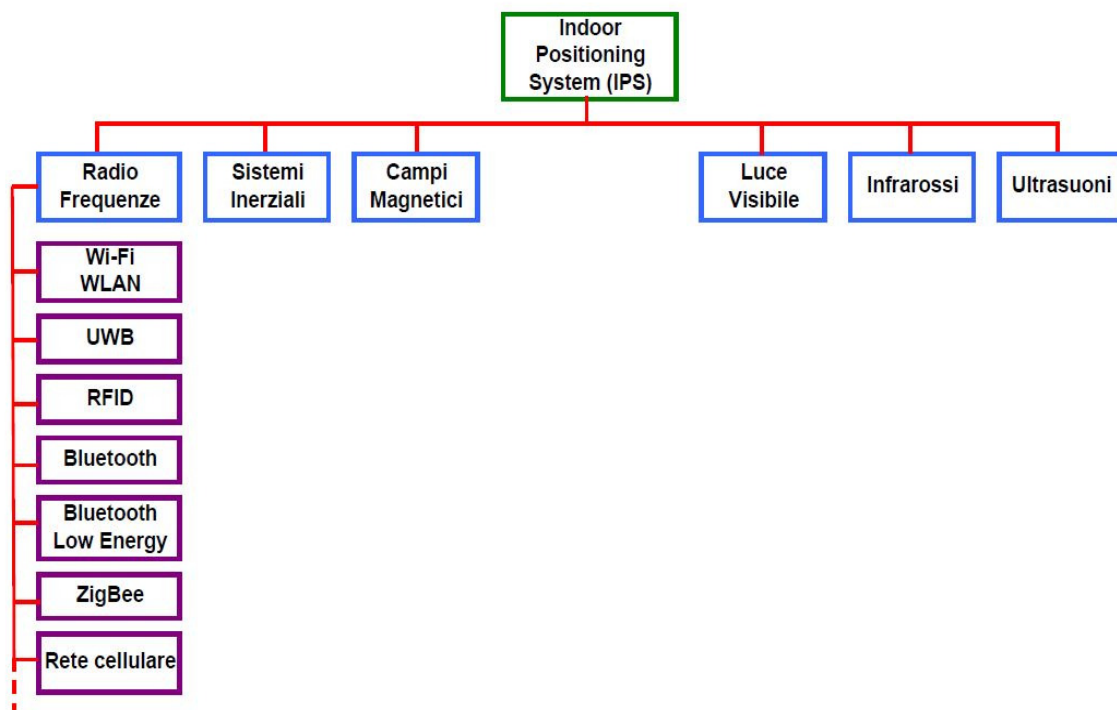


Figura 4.1: principali tecnologie utilizzabili per applicazioni di posizionamento in ambienti chiusi

In alcuni casi per aumentare le prestazioni dei sistemi di posizionamento indoor si utilizzano più tecnologie contemporaneamente. Le tecnologie ibride sono state oggetto di diversi studi, tra cui possiamo trovare sistemi inerziali supportati da segnali a radio frequenza [D20], sistemi a radio frequenza integrati con sensori di movimento e/o orientamento, come ad esempio giroscopi, accelerometri, tachimetri e bussole [D16] [D19], sistemi con marcatori visivi a supporto di diverse tecnologie di posizionamento [D9] e sistemi magnetici supportati eventualmente da segnali radio o inerziali [F4].

Nel nostro caso, come verrà illustrato nel prossimo capitolo, la tecnologia selezionata per sviluppare il sistema di localizzazione di galleria è basata sulle onde radio a 2.4 GHz, in particolare sulle trasmissioni Bluetooth Low Energy (BLE) emesse da particolari dispositivi elettronici denominati Beacon BLE. Tale sistema non preclude però la possibilità di essere supportato da altre tecnologie di posizionamento, come ad esempio quella inerziale o quella geomagnetica¹².

Per completezza di trattazione, prima di addentrarci nel progetto che ha caratterizzato la ricerca, si riportano nei paragrafi seguenti i principali aspetti sulle tecniche di localizzazione indoor che sfruttano segnali elettromagnetici, in particolare nell'ambito delle radio frequenze. Si precisa che in questo elaborato il termine radio frequenza (RF) viene utilizzato per richiamare anche le trasmissioni di lunghezza d'onda centimetrica (microonde), quindi si intendono comprese le bande UHF (Ultra High Frequency) e SHF (Super High Frequency), in particolare si farà riferimento alla frequenza di nostro interesse di 2.4 GHz.

4.2 Principali tecniche di ranging

Un sistema di localizzazione indoor viene generalmente sviluppato con una configurazione definita *Anchor-Based*, ovvero con i nodi di riferimento che presentano una posizione statica nel tempo, ma in applicazioni particolari può rendersi invece necessario utilizzare un sistema *Anchor-Free*, dove i nodi di riferimento sono in movimento, si pensi ad esempio a sensori di rilevamento fluttuanti in un fluido, ad esempio in mare per il monitoraggio dell'ambiente marino. Il caso di nostro interesse

¹² In relazione alla tecnologia di posizionamento geomagnetica si segnala un sistema, basato appunto sul campo magnetico terrestre, sviluppato dalla GiPStech S.r.l. [F4]. Si tratta di una tecnologia sicuramente interessante, che ben si sposa a realizzazioni ibride con Beacon BLE, ma che presenta la necessità di dover realizzare una mappatura preventiva (*fingerprinting*) delle distorsioni magnetiche che caratterizzano ciascun ambiente.

rientra in un sistema definibile *Anchor-Based*, dove i nodi di riferimento sono statici e hanno la funzione di trasmettere i segnali ad un nodo ricevente mobile (smartphone) che dovrà provvedere ad auto localizzarsi nella superficie di una galleria stradale.

Per arrivare a stimare il posizionamento di un dispositivo è necessario individuare la tecnica di *ranging* più idonea. Queste tecniche si utilizzano infatti per stimare la distanza tra un trasmettitore e un ricevitore, o più in generale tra un punto di riferimento e un punto ignoto da localizzare. Volendo essere più precisi le tecniche di *ranging* si dividono in *Range-Based* e *Range-Free*; le prime si basano sull'elaborazione di determinati parametri per ottenere la stima della distanza tra il punto di riferimento e il punto incognito, mentre i secondi utilizzano approcci alternativi, non necessariamente legati alla distanza, per giungere alla localizzazione del punto sconosciuto.

Le tecniche *Range-Free* saranno richiamate brevemente più avanti, nell'ambito della descrizione di alcuni algoritmi di posizionamento. Di seguito invece si illustrano le principali tecniche *Ranged-Based*.

4.2.1 Time of Arrival (ToA)

La stima della distanza è ricavata dalla misura del tempo di propagazione del segnale. Questa tecnica è utilizzata nel sistema GPS per stimare la distanza tra il satellite trasmittente e il dispositivo ricevente. Si può calcolare la distanza tra due punti conoscendo il tempo t_a impiegato dal segnale per giungere al ricevitore. In prima approssimazione, considerando una velocità di propagazione costante, si può utilizzare la semplice relazione:

$$d = c \cdot t_a \tag{4.1}$$

dove:

d è la distanza tra trasmettitore e ricevitore in metri;

c è la velocità di propagazione (nel vuoto circa $3 \cdot 10^8$ m/s);

t_a è il tempo di arrivo in secondi.

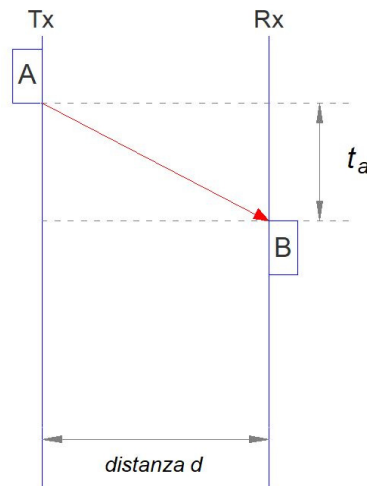


Figura 4.2: schematizzazione della tecnica *Time of Arrival*

Il ricevitore B, per calcolare il tempo di arrivo e quindi la distanza dal trasmettitore A, effettua la differenza tra l'orario di ricezione e quello di trasmissione, quest'ultimo contenuto sotto forma di informazione nel pacchetto dati trasmesso. Per poter utilizzare tale metodo è necessaria una sincronizzazione di orario tra il ricevitore e il trasmettitore, così come avviene nel sistema GPS, dove un quarto satellite invia un clock di calibrazione ottenuto da un orologio atomico. Il *Time of Arrival* risulta quindi di notevole complessità in applicazioni di posizionamento locali, inoltre quando le distanze in gioco tra trasmettitore e ricevitore sono particolarmente piccole è necessario, per non introdurre errori significativi, operare con periodi di clock così brevi da risultare difficilmente raggiungibili.

4.2.2 Time of Flight (ToF)

L'utilizzo di questo parametro consente di superare le problematiche, viste nel *ToA*, legate alla sincronizzazione dell'orario tra trasmettitore e ricevitore. In questo caso però i due dispositivi devono essere sia trasmettenti che riceventi, in quanto il tempo impiegato dal segnale viene calcolato in andata e ritorno. In pratica il dispositivo A trasmette un segnale che impiega un tempo t_{f1} a raggiungere il dispositivo B, quest'ultimo impiega un tempo t_d per elaborare i dati e per trasmettere la risposta di avvenuta ricezione, la quale a sua volta impiega un tempo t_{f2} per raggiungere A. Il dispositivo A, grazie ad un contatore interno, registra il tempo complessivo t_{tot} per l'esecuzione delle operazioni descritte e, conoscendo il tempo t_d (*computing time*), sarà

in grado di calcolare il tempo di volo e quindi la distanza da B. La figura seguente illustra quanto descritto.

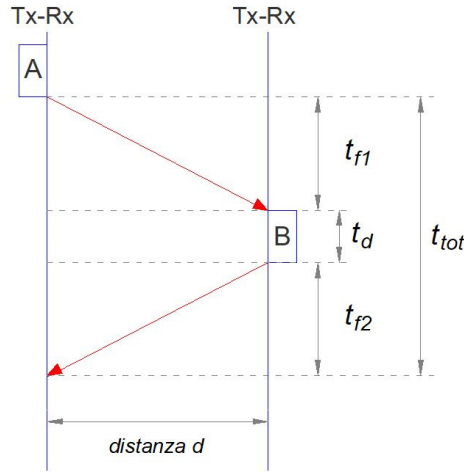


Figura 4.3: schematizzazione della tecnica *Time of Flight*

Il tempo di volo è quindi dato dalla seguente relazione:

$$t_{of} = t_{tot} - t_d = t_{f1} + t_{f2} \quad (4.2)$$

da cui si può ottenere la distanza tra i dispositivi A e B:

$$d = c \cdot \left(\frac{t_{of}}{2} \right) \quad (4.3)$$

La tecnica del *Time of Flight*, pur risolvendo i problemi della sincronizzazione, introduce un significativo incremento della complessità e limita le possibili applicazioni, in quanto con questo sistema si rende necessario realizzare trasmissioni bidirezionali. Inoltre permangono i problemi relativi al conteggio di tempi di volo brevissimi, dovuti alle piccole distanze presenti nei sistemi di posizionamento indoor.

4.2.3 Angle of Arrival (AoA) e Angle of Departure (AoD)

Queste tecniche sono finalizzate ad ottenere l'angolo di arrivo (AoA) oppure l'angolo di partenza del segnale (AoD) e non direttamente la distanza tra trasmettitore e ricevitore. I dati relativi agli angoli potranno poi essere utilizzati in un sistema di localizzazione basato sulla nota tecnica della triangolazione del segnale. La rilevazione degli angoli,

generalmente basata sullo sfasamento dei segnali, richiede l'utilizzo di un hardware abbastanza complesso, in quanto è necessario dotare il ricevitore (nel caso di AoA) oppure il trasmettitore (nel caso di AoD) di una serie di antenne (array). La presenza di più antenne connesse al dispositivo, oppure l'integrazione di questi elementi all'interno del dispositivo stesso, possono rappresentare una significativa complicazione del sistema, in particolare quando il dispositivo interessato è di tipo mobile.

La figura 4.4 schematizza la tecnica dell'angolo di arrivo con l'utilizzo di due antenne riceventi per la stima della posizione di un trasmettitore mobile.

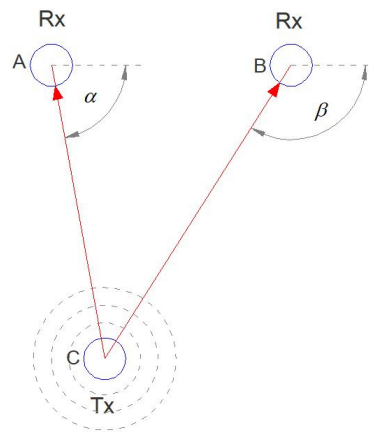


Figura 4.4: schematizzazione della tecnica *Angle of Arrival*

Come vedremo nel paragrafo 4.4 questa tecnica di localizzazione è stata oggi rispolverata grazie ad un supporto software ottimizzato e direttamente implementato nella versione 5.1 di Bluetooth.

4.2.4 Receive Signal Strength Indicator (RSSI)

Il parametro RSSI è un indicatore relativo alla potenza del segnale ricevuto. Attraverso il valore di RSSI il ricevitore può stimare la distanza dal trasmettitore, ma è necessario che questo trasmetta nel tempo con una potenza costante predeterminata.

In condizioni ideali¹³ il legame che lega la potenza del segnale ricevuto con la distanza percorsa è esprimibile con l'*equazione di Friis*, di seguito riportata:

¹³ Nelle condizioni ideali si suppone che l'antenna trasmittente sia un radiatore puntiforme isotropico, quella ricevente si trovi nella regione di *campo lontano* dall'antenna trasmittente (regione dove il campo elettromagnetico ha localmente le caratteristiche di un'onda piana uniforme) e soprattutto si suppone che la trasmissione avvenga in condizioni di *spazio libero*, ovvero attraverso un mezzo senza perdite, considerabile quindi un dielettrico perfetto, omogeneo e isotropo, come avviene nel vuoto.

$$P_R = P_T \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d^n} \quad (4.4)$$

dove:

P_R è la potenza del segnale ricevuto in watt;

P_T è la potenza del segnale trasmesso in watt;

G_T e G_R sono rispettivamente il guadagno di antenna in trasmissione e in ricezione;

λ è la lunghezza d'onda in metri ($\lambda = c/f$);

d è la distanza tra trasmettitore e ricevitore in metri;

n è la costante di propagazione del segnale (in spazio libero $n = 2$).

In condizioni ideali, assumendo G_T e G_R di valore unitario, la potenza ricevuta risulta dipendere dalla potenza trasmessa e dall'attenuazione da spazio libero. In condizioni reali, come vedremo, occorre invece considerare anche le perdite di percorso (*path loss*) dovute a numerosi e complessi fenomeni di propagazione delle onde elettromagnetiche.

Normalmente in questi ambiti di utilizzo la potenza del segnale, in particolare quando si usa l'indicatore RSSI, viene espressa in dBm¹⁴ (decibel milliwatt); si tratta di un'unità di misura logaritmica riferita alla potenza di 1 mW (0 dBm = 1 mW). La relazione di conversione è la seguente:

$$P[\text{dBm}] = 10 \log_{10} (P[W] \cdot 10^3) \quad (4.5)$$

Generalmente, nell'ambito dell'indoor positioning, basandosi sulla (4.4), RSSI viene espresso in dBm attraverso il noto modello di propagazione, richiamato in numerosi studi [D13][D17]:

$$RSSI(d) = RSSI(d_0) - 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (4.6)$$

dove:

$RSSI(d)$ rappresenta la potenza del segnale ricevuto a una distanza d dal trasmettitore;

¹⁴ Si precisa che tale unità di misura, secondo le regole, dovrebbe essere espressa in dBmW, ma l'abbreviazione dBm è quella effettivamente utilizzata e riconosciuta in ogni ambito (incluso le indicazioni sugli strumenti di misura), pertanto in questo elaborato si è ritenuto opportuno utilizzare esclusivamente la forma abbreviata.

$RSSI(d_o)$ rappresenta la potenza del segnale ricevuto alla distanza di riferimento d_o usata per la calibrazione;

n è la costante di propagazione (approssimabile a 2 in esterno senza ostacoli, mentre in condizioni indoor generalmente risulta necessario individuare valori (es. da 1 a 6) che tengano conto dell'ambiente di propagazione (geometria, presenza di ostacoli, ecc.).

Per meglio approssimare le condizioni reali la relazione (4.6) viene spesso arricchita con altri coefficienti correttivi; ad esempio diversi studi [D7][D11][D15][D24][D25] riportano una variabile gaussiana di rumore, come rappresentato dal termine X_σ nella seguente relazione:

$$RSSI(d) = RSSI(d_o) - 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_o} \right) + X_\sigma \quad (4.7)$$

Trascurando il coefficiente X_σ ed ipotizzando di utilizzare la tipica distanza di riferimento $d_o = 1$ m, si ottiene la nota relazione semplificata richiamata in diverse ricerche di localizzazione indoor, tra cui quella di Kaczmarek et al. del 2016 [D8]:

$$RSSI(d) = -10n \log_{10}(d) + A \quad (4.8)$$

dove A rappresenta la potenza in dBm del segnale ricevuto alla distanza di riferimento di 1 metro.

Isolando d dalla (4.8) si può calcolare la distanza in metri tra il trasmettitore e il ricevitore conoscendo $RSSI$, il valore di A e il coefficiente n , il quale può essere calibrato per approssimare meglio la relazione all'ambiente reale di propagazione:

$$d = 10^{\left(\frac{A - RSSI(d)}{10n} \right)} \quad (4.9)$$

La figura seguente riporta la curva teorica in spazio libero della relazione (4.8) che lega l'indicatore RSSI con la distanza, nel caso di $A = -40$ dBm e $n = 2$.

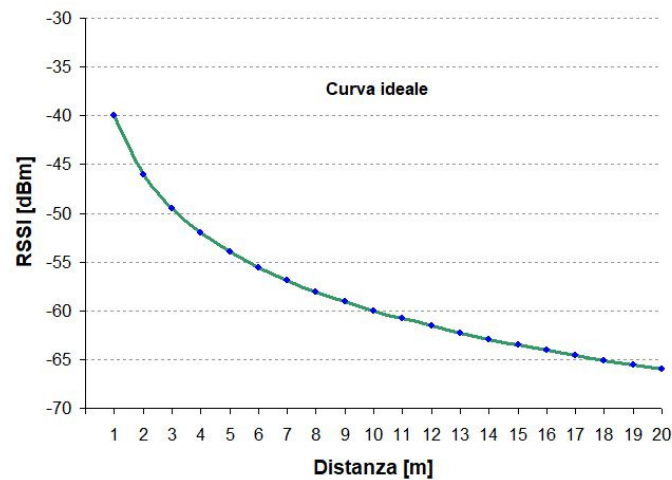


Figura 4.5: curva ideale RSSI-distanza ($A = -40$ dBm; $n = 2$)

L'andamento ideale della curva di figura 4.5, ottenuto considerando l'*attenuazione da spazio libero*, purtroppo nelle applicazioni reali è fortemente influenzato da complessi e variabili fenomeni che agiscono sulla propagazione del segnale. Tali fenomeni, nella maggior parte dei casi, risultano di difficile modellazione; di fatto il segnale ricevuto assume un comportamento più o meno aleatorio, a seconda della frequenza dell'onda elettromagnetica e delle condizioni ambientali al contorno. L'esempio di figura 4.5b, tratta da uno studio di Zou Han et al. del 2016 [D25] sul positioning con Beacon BLE in ambienti semiaperti (es. porticati con colonne), evidenzia le criticità della relazione RSSI-distanza in condizioni reali. Tali aspetti saranno comunque ripresi e approfonditi sperimentalmente nel successivo capitolo.

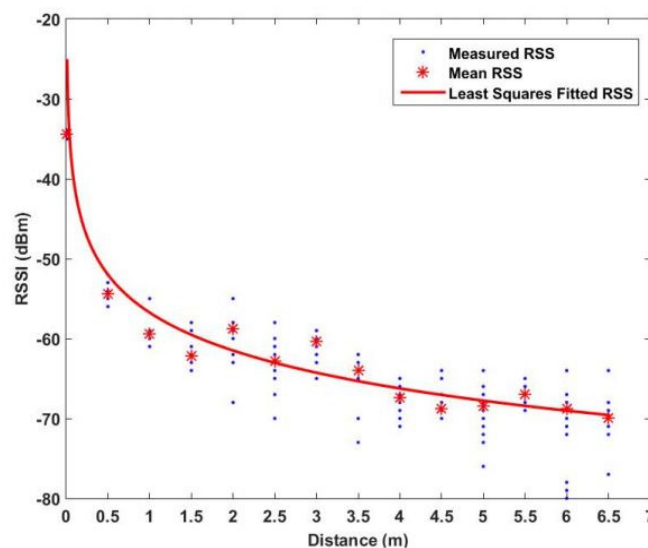


Figura 4.5b: curva RSSI-distanza rilevata in una ambiente reale semiaperto [D25]

Di seguito si riportano e si illustrano (figura 4.6) alcuni tipici fenomeni che influenzano la propagazione del segnale elettromagnetico, precisando che nelle condizioni reali possono facilmente manifestarsi in modo più o meno contemporaneo:

- Riflessione (dovuta alla presenza di oggetti e ostacoli, ma anche solo per la presenza del terreno);
- Assorbimento (l'energia viene assorbita da ostacoli, ma anche da polvere, molecole di acqua, ecc.);
- Diffrazione (ad esempio quando l'onda elettromagnetica incontra il bordo netto di un ostacolo, questo bordo assume il comportamento di un emettitore lineare);
- Diffusione o *Scattering* (quando l'onda elettromagnetica incontra un oggetto piccolo, rispetto alla sua lunghezza d'onda, l'oggetto assume il comportamento di un emettitore puntiforme. Tale fenomeno può essere causato anche da impurità presenti nell'aria).

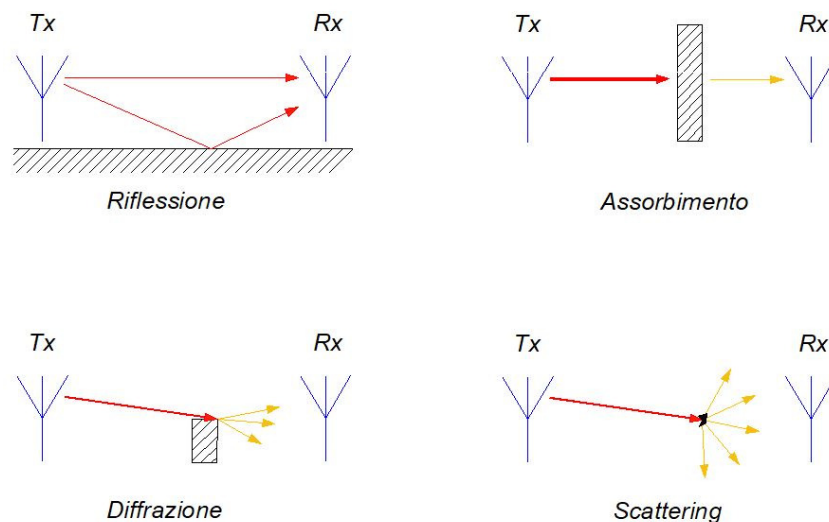


Figura 4.6: fenomeni che influenzano la propagazione del segnale elettromagnetico

Senza addentrarci troppo negli aspetti teorici di propagazione, si approfondiscono brevemente i fenomeni in grado di influenzare significativamente la relazione RSSI-distanza nelle applicazioni di indoor positioning, in particolare quando si opera alla frequenza di nostro interesse, ovvero nell'intorno dei 2.4 GHz:

- *Multi-path fading* - Si tratta di un fenomeno connesso con le riflessioni, le diffrazioni e lo scattering che il segnale subisce negli ambienti reali a seguito della

presenza di superfici, oggetti e persone. Il fenomeno, a parità di frequenza, dipende principalmente dalle caratteristiche degli ambienti e dalla tipologia delle antenne (direzionali, omnidirezionali, ecc.). In letteratura sono disponibili diverse tecniche per modellare il comportamento del segnale, ma tale compito risulta particolarmente difficile quando nell'ambiente sono presenti oggetti o persone in movimento. In pratica nella propagazione il segnale può seguire percorsi multipli e quindi il ricevitore può essere interessato dal segnale diretto, detto in linea di vista (*Line of Sight - LOS*) e/o dai segnali riflessi (*No Line of Sight - NLOS*). Il risultato della ricombinazione dei segnali a livello del ricevitore può portare ad attenuazioni, amplificazioni e distorsioni che dipendono da diversi fattori, come ad esempio il numero delle repliche, le relative fasi e le ampiezze.

- *Guadagno e polarizzazione* - In condizioni reali occorre fare i conti con il comportamento non ideale delle antenne trasmettenti e riceventi, in relazione anche al loro orientamento, in particolare quando si deve operare con dispositivi mobili. In pratica l'ipotesi di un guadagno di antenna unitario in tutte le direzioni (antenne omnidirezionali) non risulta verificato e spesso tale comportamento introduce significativi errori di calcolo. Altri errori, più o meno significativi, possono essere dovuti alle variazioni di polarizzazione dell'onda.
- *Assorbimento* - Fenomeni di assorbimento possono essere dovuti anche al mezzo di trasmissione non ideale (aria), ad esempio per la presenza di polveri e vapore acqueo, ma nelle applicazioni di nostro interesse i fenomeni di assorbimento che possono incidere significativamente sul segnale ricevuto sono dovuti ad ostacoli veri e propri lungo il percorso di propagazione del segnale. Gli ostacoli, anche oggetti di modeste dimensioni e persone, sono infatti in grado di oscurare la linea di vista tra trasmettitore e ricevitore e considerando l'elevata frequenza dell'onda (2.4 GHz), sono in grado di procurare significativi fenomeni di attenuazione e distorsione del segnale (*shadowing*).

Come abbiamo visto l'utilizzo dell'indicatore RSSI risulta relativamente semplice rispetto alle altre tecniche di *ranging*, ma presenta criticità che devono essere valutate, caso per caso, a seconda della specifica applicazione di indoor positioning. Nella nostra applicazione di galleria, come vedremo, una particolare architettura hardware consentirà

di irrobustire il sistema per poter utilizzare il parametro RSSI con risultati soddisfacenti e dal sostenibile rapporto costi/prestazioni, utilizzando tecniche di positioning relativamente semplici. Occorre comunque ricordare che in questi ultimi anni si sono fatti notevoli progressi nell'ambito dei software di positioning, in particolare in merito ad algoritmi e filtri per ridurre le labilità connesse con il comportamento dei segnali radio e quindi dei valori RSSI [D14][D24][F7].

Nei paragrafi successivi saranno invece illustrate brevemente le tecniche di positioning che meglio si adattano ad utilizzare l'indicatore RSSI all'interno di reti WSN (Wireless Sensor Network) più o meno complesse.

4.3 Tecniche di positioning con l'utilizzo dell'indicatore RSSI

L'indicatore o parametro RSSI può essere utilizzato anche come dato di ingresso in diverse tecniche di positioning, le quali costituiscono la successiva fase del processo di localizzazione, finalizzato appunto a stimare la posizione del nodo incognito, posizione che nel caso di nostro interesse si trova sul piano bidimensionale. In generale l'indicatore RSSI può essere sfruttato sia nella fase operativa (stima in tempo reale dei valori per individuare la posizione nell'ambiente) sia in eventuali fasi di calibrazione (stima e memorizzazione preliminare dei valori per realizzare un'impronta dello specifico ambiente). Noti i valori di RSSI sarà possibile applicare diverse tecniche di positioning, tra cui le principali descritte nel seguito.

4.3.1 Cell of Origin (CoO)

Il Cell of Origin, chiamato generalmente localizzazione di prossimità, è uno dei metodi più semplici per realizzare il positioning di un nodo incognito, in quanto la procedura consiste nel determinare la posizione in base al segnale ricevuto più forte. In pratica il nodo incognito viene localizzato in prossimità del nodo di riferimento che ha fornito il valore RSSI più elevato. In questi sistemi l'accuratezza e le soluzioni di continuità della localizzazione dipendono principalmente dalla densità e dalle caratteristiche della distribuzione nell'ambiente dei nodi di riferimento, nonché dalle caratteristiche di copertura del segnale radio emesso. Con un numero elevato di nodi di riferimento le prestazioni e soprattutto la robustezza della localizzazione diventano molto interessanti, inoltre il CoO si presta ad essere utilizzato anche come metodo di supporto quando, in

determinate circostanze ambientali, altre tecniche più complesse di positioning entrano in difficoltà.

Questa tecnica merita quindi di essere valutata in base alle esigenze applicative e soprattutto quando risulta sostenibile l'installazione di numerosi nodi di riferimento, come generalmente avviene con la tecnologia dei Beacon BLE che vedremo più avanti.

4.3.2 Min-Max

Questo algoritmo di posizionamento, basato sugli studi di Andreas Savvides (2002) [D14] e richiamato in successive ricerche di indoor positioning [D21], richiede un basso impegno computazionale e, nonostante la sua semplicità, fornisce stime di posizionamento che non si allontanano molto da quelle ottenibili con tecniche più complesse, come ad esempio la multilaterazione. L'algoritmo Min-Max si basa sulla tracciatura di linee virtuali (due orizzontali e due verticali) intorno ai nodi di riferimento (ancore); in pratica si realizza intorno ad ogni ancora un quadrato dimensionato in base alla distanza stimata attraverso il valore RSSI. Ogni quadrato, contenente al centro la sua ancora, avrà il lato doppio rispetto alla distanza stimata tra il nodo stesso e il nodo incognito in corso di localizzazione. Utilizzando tre ancore si ottiene l'intersezione di tre quadrati ed è possibile stimare la posizione del nodo incognito nel centro del quadrilatero generato da tale intersezione.

Nella figura 4.7 si schematizza quanto descritto, ipotizzando come nodi di riferimento o ancore i dispositivi trasmettenti 1, 2 e 3, mentre come nodo incognito il dispositivo ricevente mobile ni , il quale attraverso i segnali ricevuti dai trasmettitori e con l'utilizzo di un apposito applicativo potrà provvedere alla sua auto localizzazione.

Considerando ad esempio l'ancora trasmettente 1 (x_1, y_1) , il suo quadrato è definito dalla relazione seguente:

$$[x_1 - d_1, y_1 - d_1] \times [x_1 + d_1, y_1 + d_1] \quad (4.10)$$

mentre il quadrilatero di intersezione viene calcolato prendendo i massimi e i minimi di tutte le coordinate:

$$[\max(x_i - d_i), \max(y_i - d_i)] \times [\min(x_i + d_i), \min(y_i + d_i)] \quad (4.11)$$

la posizione stimata del ricevitore sarà data dalla media di queste coordinate, coincidente con il centro del quadrilatero.

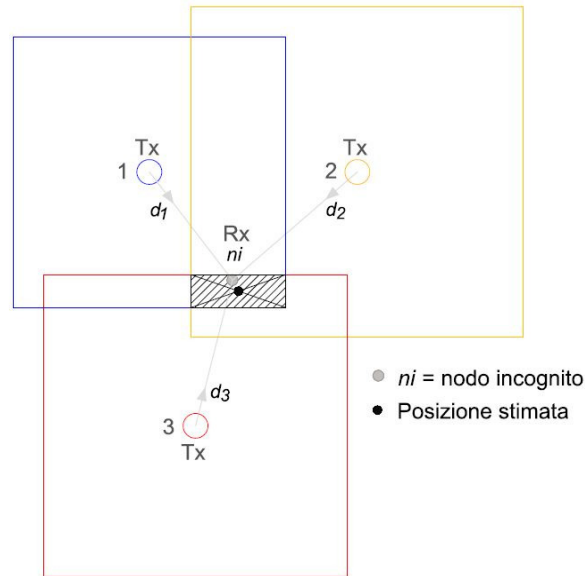


Figura 4.7: stima del posizione con la tecnica Min-Max

La stima della posizione del nodo incognito sarà naturalmente affetta da errori legati sia al *ranging* ottenuto con RSSI sia all'algoritmo di posizionamento. In questo caso l'algoritmo Min-Max, seppur semplice, restituisce un buon compromesso tra impegno computazionale e accuratezza di posizionamento, così come è stato evidenziato in uno studio di Zanca et al. (2008) [D21]. In pratica con questa tecnica l'errore di localizzazione dipende dalle dimensioni del quadrilatero di intersezione; naturalmente più questo sarà piccolo più saranno contenute le possibili deviazioni tra il punto stimato e l'effettiva posizione del punto incognito.

4.3.3 Trilaterazione

Si tratta di una tecnica particolarmente interessante, riportata in diversi studi e applicazioni di indoor positioning [D6][D8]. In generale anche questo algoritmo sfrutta le distanze tra i nodi di riferimento e il nodo incognito per stimare la posizione di quest'ultimo. Nel nostro caso, come si è detto, si prevede che le distanze in gioco vengano stimate attraverso il valore RSSI.

Nel piano bidimensionale la tecnica della trilaterazione può essere applicata tracciando intorno ad ogni ancora una circonferenza di raggio pari alla distanza stimata con RSSI; il punto di intersezione delle tre circonferenze corrisponde alla posizione del nodo incognito (figura 4.8). Risulta intuitiva l'estensione della tecnica anche allo spazio tridimensionale, dove sarà però necessaria la costruzione di sfere al posto delle circonferenze, così come appunto avviene nel sistema GPS.

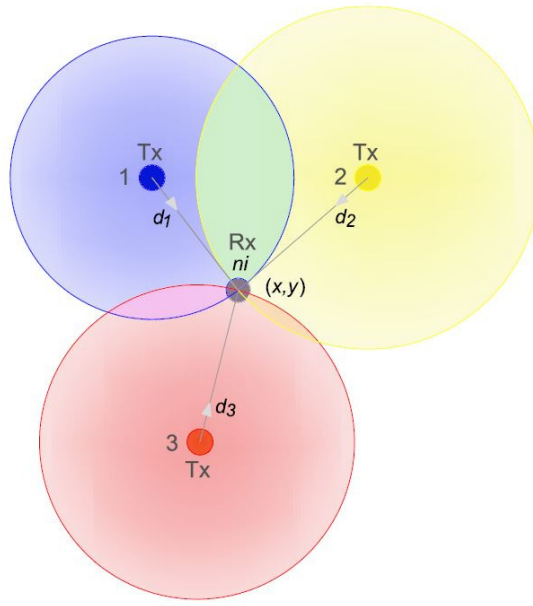


Figura 4.8: stima del posizionamento con la tecnica della Trilaterazione

Ogni circonferenza di figura 4.8 è descritta dalla seguente equazione:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = r_i^2 \quad (4.12)$$

dove (x_i, y_i) sono le coordinate dei relativi centri e r_i è il raggio i-esimo.

Per ottenere il punto di intersezione e quindi localizzare il nodo incognito occorre risolvere il seguente sistema:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r_3^2 \end{cases} \quad (4.13)$$

La situazione di figura 4.8 è però teorica, in quanto le stime delle distanze attraverso l’RSSI non sono esatte e generalmente non si ottiene mai un solo punto di intersezione. Nelle situazioni reali, come si è visto precedentemente, il legame RSSI-distanza presenta una certa aleatorietà, pertanto invece di un punto di intersezione si ottengono generalmente aree di intersezione, oppure geometrie con cerchi tangenti o che non arrivano a toccarsi; la figura 4.9 illustra alcuni esempi di queste geometrie.

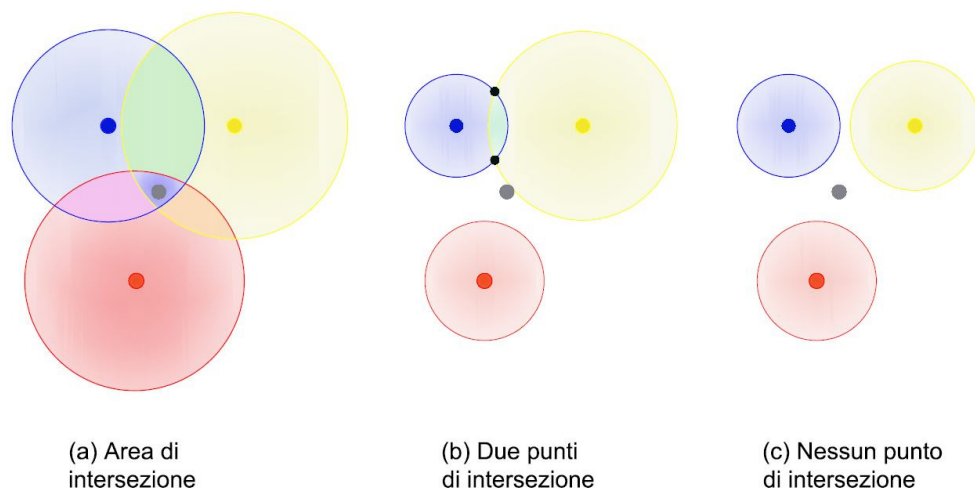


Figura 4.9: problemi di localizzazione con la tecnica della Trilaterazione, dovuti ad errato *ranging*

Per tentare di superare gli inconvenienti di figura 4.9 e ottenere comunque una stima della posizione del nodo incognito si utilizzano diverse tecniche, tra cui le seguenti:

- caso (a) - se i cerchi si intersecano generando diverse zone di decisione, si costruiscono all’interno di queste zone dei triangoli aventi come vertici i punti di intersezione. Per la stima della posizione del nodo incognito saranno mediate le coordinate del triangolo costruito all’interno della zona di minore estensione;
- caso (b) - se si hanno due punti di intersezione, la posizione del nodo incognito dovrà essere assegnata al punto che si trova più vicino al terzo nodo di riferimento;
- caso (c) - se non ci sono punti di intersezione si dovranno aumentare proporzionalmente i raggi sino ad ottenere una intersezione.

Risulta evidente che la complessità e l'accuratezza della trilaterazione nelle applicazioni di indoor positioning viene generalmente vanificata dagli errori compiuti a livello di stima delle distanze in gioco (*ranging*). Questo aspetto, in molti casi pratici, rende più efficiente orientare la scelta sulla tecnica di posizionamento Min-Max vista precedentemente, in particolare quando si desidera un minor impegno computazionale.

4.3.4 Multilaterazione

La multilaterazione può essere intesa come l'estensione della tecnica della trilaterazione ad un numero di nodi di riferimento maggiore di tre. La tecnica viene utilizzata per mitigare gli errori di *ranging*, stimando appunto le distanze del nodo incognito da numerosi nodi di riferimento. Naturalmente l'impegno computazionale risulta maggiore e, in assenza di un adeguata potenza di calcolo, si possono avere significativi ritardi nell'aggiornamento della posizione del nodo mobile, in particolare quando questo si muove velocemente. Con un numero n di nodi di riferimento, il sistema per la localizzazione del nodo incognito, visto in (4.13), viene così modificato:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r_3^2 \\ \vdots \\ (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 = r_n^2 \end{cases} \quad (4.14)$$

Si evidenzia che oggi gli algoritmi di positioning in grado di operare con tecniche di trilaterazione e multilaterazione sono numerosi e in continuo sviluppo. Particolarmente interessanti, come vedremo, sono le soluzioni basate sulla multilaterazione pesata dei segnali ricevuti, le quali non operano un rigoroso RSSI ranging (§ 4.2.4), ma sono in grado di stimare la posizione del nodo incognito attraverso comparazioni, più o meno articolate, delle potenze ricevute dai vari nodi di riferimento.

4.3.5 Fingerprint

Le tecniche di *fingerprint* rientrano nelle soluzioni di posizionamento definite *Range-Free*, infatti queste tecniche non sfruttano la relazione RSSI-distanza, ma fanno direttamente uso dei valori di RSSI memorizzati durante un'apposita fase di

calibrazione del sistema, la quale deve essere eseguita per ogni specifico ambiente prima dell'utilizzo operativo. In pratica il *fingerprint* consiste nel memorizzare preliminarmente le impronte RSSI dei nodi di riferimento, in relazione ad un certo numero di posizioni note fatte assumere dal nodo mobile. In seguito, durante la fase operativa, quando la posizione del nodo mobile non è conosciuta, i valori di RSSI rilevati verranno confrontati con quelli precedentemente memorizzati, in modo da poter stimare la posizione del nodo incognito.

Le finalità di questa tecnica sono quelle di scavalcare una parte dei problemi, visti precedentemente, al riguardo della propagazione del segnale radio e più precisamente della variabilità del legame RSSI-distanza. Generalmente queste tecniche non richiedono la conoscenza delle coordinate dei nodi di riferimento, ma è necessario conoscere le posizioni di calibrazione assunte dal nodo incognito [D5]. Risulta evidente che per applicare un sistema di localizzazione che faccia uso del *fingerprint* occorre suddividere preventivamente l'ambiente in punti o aree di riferimento; la densità di questa griglia sarà proporzionale all'accuratezza del posizionamento. Le tecniche di *fingerprint* utilizzano diversi algoritmi per utilizzare al meglio le impronte RSSI relative ad ogni nodo di riferimento, tali algoritmi possono essere sia di tipo deterministico che probabilistico, un esempio di questo secondo approccio è riscontrabile nelle applicazioni basate su metodi Bayesiani, i quali trattano la stima del posizionamento come un problema di decisione statistica. In questo caso gli algoritmi di posizionamento sono basati su funzioni di verosimiglianza, ad esempio ad un nodo incognito viene assegnata la posizione p_i quando tale posizione è la più probabile dato un certo vettore $\underline{s}$, relativo ai segnali RSSI. In pratica viene assegnata la posizione p_i se si verifica la seguente relazione:

$$P(p_i | \underline{s}) > P(p_j | \underline{s}) \quad (4.15)$$

con $j = 1, 2, 3, \dots, n$

e $j \neq i$

Il *fingerprint* può essere applicato anche con un numero minimo di punti di calibrazione, ad esempio quando si vuole utilizzare questa tecnica a supporto degli algoritmi di posizionamento *Range-Based* visti precedentemente. In ogni caso si tratta di soluzioni non sempre gradite, in quanto aumentano la complessità e richiedono

lunghe tarature, inoltre i vantaggi prestazionali si riducono significativamente quando le condizioni ambientali sono variabili e poco modellabili, come avviene in presenza di elementi in movimento casuale.

4.3.6 Altri algoritmi e filtri di segnale

Sin qui abbiamo visto le principali tecniche di posizionamento basate sull'indicatore RSSI, ma la ricerca in questo ambito è molto vasta e in continua evoluzione, pertanto in letteratura e a livello industriale si possono trovare numerosi studi su varianti e nuovi algoritmi, alcuni dei quali custoditi gelosamente. Tra i primi interessanti studi si segnala quello di Liu Chong del 2004 (Sensor localization with ring overlapping based on comparison of received signal strength indicator) [D10] e quello di Patwari Neal del 2001 (Relative location in wireless networks) [D13]. Il primo studio propone una tecnica *Range-Free* con l'utilizzo di un algoritmo, denominato ROCSSI, dove i valori di RSSI non vengono utilizzati per calcolare la distanza trasmettitore-ricevitore, bensì per operare un confronto tra i dati di potenza rilevati, considerando anche quelli memorizzati in fase di calibrazione. La tecnica, assumendo semplicemente che la potenza del segnale ricevuto diminuisce con l'aumentare della distanza dal trasmettitore, prevede di utilizzare i dati acquisiti per tracciare degli anelli intorno ai nodi; la posizione del nodo incognito viene stimata all'interno dell'area di intersezione, interessata dal maggior numero di anelli.

Il secondo studio affronta invece la localizzazione con un approccio basato sull'inferenza statistica. La tecnica, denominata ML (Maximum Likelihood), prevede infatti di individuare la posizione del nodo incognito attraverso una formulazione di massima verosimiglianza, basata sulla probabilità di ricevere un determinato valore RSSI in relazione ad ogni potenziale posizione del nodo da localizzare. La formulazione di verosimiglianza di questa tecnica tiene conto, sia delle grandezze calcolate attraverso la classica relazione (4.6) sia di quelle rilevate durante una fase preliminare di acquisizione o calibrazione. In pratica la posizione che massimizza la probabilità viene selezionata quale posizione del nodo incognito.

In letteratura sono disponibili diversi studi comparativi tra le diverse tecniche di posizionamento indoor sin qui viste, a tal proposito si segnala un'interessante ricerca di Zanca et al. (2008) [D21], nella quale è stato stimato l'errore medio di localizzazione di

una WSN (Wireless Sensor Network) a 868.3 MHz. Lo studio ha stimato l'errore medio di posizionamento, sul piano bidimensionale, in funzione del numero di nodi di riferimento (ancore) utilizzati all'interno di un locale di 10 x 10 m.

Nelle condizioni sperimentali, l'algoritmo ML ha fornito prestazioni significativamente migliori all'aumentare del numero dei nodi di riferimento presenti all'interno dell'ambiente. Gli algoritmi ROCRSSI e Multilaterazione hanno invece fornito risultati simili con prestazioni generalmente inferiori alla tecnica ML, mentre il Min-Max, nonostante il suo basso costo computazionale, ha fornito risultati intermedi di buon compromesso.

La ricerca di Zanca evidenzia inoltre, come era intuitivo aspettarsi, che gli errori di localizzazione generalmente diminuiscono in prossimità delle ancore, ma aumentano significativamente vicino agli angoli dell'ambiente. Come vedremo nel prossimo capitolo, anche le sperimentazioni del nostro studio hanno restituito un comportamento simile, che riteniamo, in accordo con Zanca, dovuto principalmente all'incremento del fenomeno del *Multi-path*, precedentemente descritto.

Per ridurre gli errori di indoor positioning è necessario, in molti casi, utilizzare tecnologie di miglioramento dei segnali ricevuti; generalmente si tratta di filtri in grado di agire sulle forme d'onda ricevute, in modo da ottenere segnali più puliti, oppure escludere quelli inutili o fuorvianti. Nel caso dell'indicatore RSSI lo scopo è sempre quello di ottenere dei valori attendibili di potenza, in grado di restituire localizzazioni con errori accettabili in relazione alla specifica applicazione. Queste tecnologie di miglioramento dei dati ricevuti si basano anche su informazioni note relative al nodo incognito e all'ambiente circostante (posizione iniziale o precedente, velocità di movimento, accelerazione, orientamento magnetico, presenza di ostacoli, dati planimetrici ecc.), al fine di stimare variabili utili all'ottimizzazione del processo di localizzazione. Come tutti i processi di calcolo, anche l'utilizzo di questi filtri comporta un costo computazionale, ma un utilizzo studiato consente in molti casi di aumentare l'accuratezza del sistema di localizzazione senza significativi incrementi di latenza, in particolare quando i filtri vengono utilizzati per scartare dall'elaborazione i dati inutili. Nei sistemi di indoor positioning a radio frequenza sono particolarmente utilizzati i seguenti filtri:

Particles filters - si tratta di algoritmi statistici, basati sui noti metodi Monte Carlo, finalizzati a filtrare i dati in modo da escludere o correggere, su base probabilistica, quelli meno attendibili o ritenuti al di fuori dei limiti di interesse.

Map matching filters - si tratta di filtri, generalmente operanti in sinergia con il *Particles filter*, utilizzati per scartare o correggere quei valori ritenuti in contrasto con i dati relativi all'ambiente. Il filtro elimina o modifica tutti quei valori che restituiscono posizionamenti certamente errati, come ad esempio quelli che individuano il nodo incognito al di fuori della planimetria dei locali.

Kalman filters

Come si evince dal nome si tratta di una famiglia di algoritmi basati sul noto filtro di Kalman, utilizzato da tempo in numerosi ambiti disciplinari. I *Kalman filters* sono in pratica dei programmi ricorsivi in grado di stimare lo stato di un sistema perturbato dal rumore; in particolare questi filtri agiscono molto bene su rumori e disturbi gaussiani a media nulla. Come è noto in queste tipologie di algoritmi la stima del valore atteso si basa su una serie di iterazioni tra due fasi principali, quella di *predizione* e quella di *correzione*. Il filtro consente di tener conto sia degli errori di misura (ad esempio a livello del sensore ricevente) sia di errori di processo (nel nostro caso anche le incertezze nei modelli di *ranging* o di *positioning*). Il rumore di misura e le incertezze sul modello vengono modellate dal filtro come un processo stocastico; in pratica il filtro si comporta come uno stimatore predittore e correttore, finalizzato a minimizzare la covarianza dell'errore di stima (tra la misura predetta e quella rilevata).

Si ritiene che gli aspetti teorici, sin qui trattati, sulle tecniche di posizionamento siano sufficienti per affrontare lo sviluppo del nostro sistema di localizzazione di galleria, pertanto, per ulteriori approfondimenti e per un quadro completo sugli algoritmi di indoor positioning, si rimanda alla letteratura specifica; in bibliografia si riportano alcuni riferimenti in merito [D1][D12][D23].

4.4 Introduzione al Bluetooth Low Energy (BLE)

Nel 2009 il Bluetooth SIG¹⁵ [F2] ha annunciato la versione 4.0 dello standard Bluetooth e poco tempo dopo ha reso disponibile la tecnologia BLE (Bluetooth Low Energy), pensata appositamente per applicazioni IoT¹⁶. Il BLE è stato ottimizzato per trasmissioni di breve durata (*short burst*) e in determinati utilizzi presenta notevoli vantaggi rispetto al Bluetooth BR/EDR¹⁷ o classico, in quanto utilizza trasmissioni interessate da piccole quantità di dati che consentono di ottenere un ridotto consumo energetico, particolarmente utile in applicazioni che richiedono di alimentare i dispositivi, per lungo tempo, attraverso piccole batterie o fonti energetiche simili. Il BLE, inoltre, presenta tempi di latenza ridotti rispetto al sistema classico e risulta particolarmente indicato per realizzare trasmissioni impulsive in broadcasting¹⁸, indispensabili in applicazioni che richiedono la trasmissione di brevi informazioni ad un numero elevato di utenti, senza la necessità di stabilire l'accoppiamento tra i dispositivi. Come nel Bluetooth classico, anche il BLE utilizza la banda di frequenza ISM¹⁹ 2.402 - 2.480 GHz e la tecnica del salto di frequenza del segnale su più canali, ma nel Bluetooth Low Energy le specifiche di funzionamento e il numero di canali sono diversi dalla versione classica, pertanto i due sistemi sono incompatibili. In ogni caso i moderni dispositivi mobili (smartphone e tablet) supportano senza problemi entrambe le tecnologie.

Oggi siamo giunti alla versione Bluetooth 5.1 e le specifiche BLE presentano interessanti miglioramenti, in particolare in merito al consumo energetico, alla portata radio, alla velocità di trasmissione e all'utilizzo in applicazioni di indoor positioning. In merito a quest'ultimo aspetto, di primario interesse per le nostre finalità, si segnala che con la versione 5.1 i servizi di localizzazione saranno più accurati, in particolare è stata introdotta una funzione per consentire di rilevare la direzione del segnale Bluetooth. La direzione della trasmissione, come illustrato dalla documentazione scaricabile dal sito

¹⁵ Il Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG) è un'organizzazione fondata nel 1998 che sovrintende lo sviluppo e la concessione in licenza delle tecnologie e dei marchi Bluetooth [F2].

¹⁶ IoT, acronimo di Internet of Things, ovvero l'estensione di Internet al mondo delle cose e dei luoghi concreti, dove gli oggetti reali sono connessi per interagire con l'ambiente e fornire funzionalità avanzate.

¹⁷ Bluetooth Base Rate/Enhanced Data Rate.

¹⁸ In telecomunicazioni per broadcasting si intende la trasmissione di informazioni da un sistema trasmittente ad un numero di riceventi elevato, non definito a priori, teoricamente illimitato.

¹⁹ La Banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) è il nome assegnato a quelle porzioni dello spettro elettromagnetico riservate ad applicazioni di radiocomunicazione per uso industriale, scientifico e medico.

del Bluetooth SIG [F2], potrà essere rilevata attraverso lo sfasamento dei segnali, sia usando l'angolo di arrivo (AoA) che l'angolo di partenza (AoD), a seconda dell'architettura del sistema di localizzazione. Per poter apprezzare lo sfasamento è necessaria però la presenza di antenne multiple connesse o integrate nel dispositivo ricevente o in quello trasmittente, rispettivamente nel caso di AoA oppure AoD, come illustrato nella figura 4.10, elaborata secondo quanto riportato nel documento del SIG in merito alle nuove caratteristiche del Bluetooth 5.1.

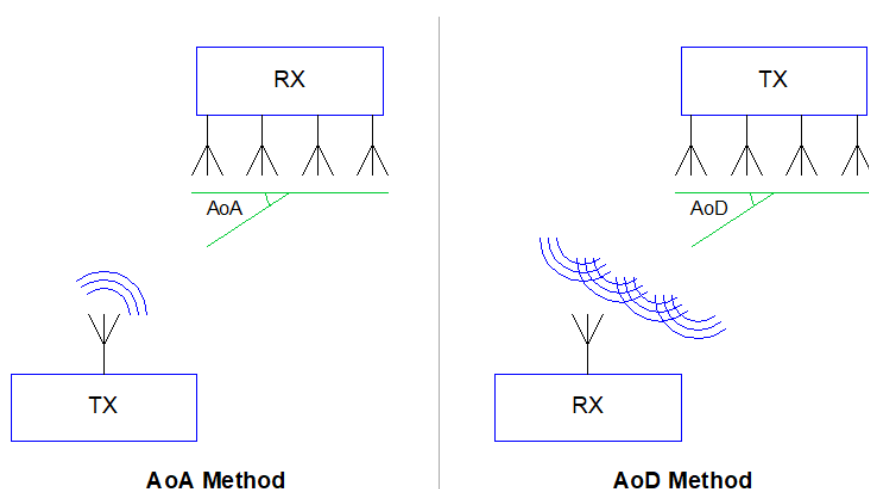


Figura 4.10: disposizione delle antenne utilizzando l'angolo di arrivo (AoA) oppure l'angolo di partenza (AoD) [F2]

Le nuove caratteristiche in merito alla direzione del segnale sono state presentate dal SIG da pochi mesi, pertanto ci troviamo in una fase di sviluppo, in particolare in merito ai necessari aspetti hardware che dovranno essere implementati nei dispositivi. Certamente la stima della direzione, in associazione alla stima della distanza con RSSI, sarà molto utile per migliorare le prestazioni della localizzazione, anche nel semplice caso di un nodo incognito che si trova in prossimità di un solo nodo di riferimento, quindi senza necessariamente dover applicare in modo completo le tecniche di triangolazione e trilaterazione.

Il Bluetooth SIG, presentando le nuove caratteristiche della versione 5.1, ha anche dichiarato di essere particolarmente interessato a proseguire sulla strada dell'innovazione e del miglioramento delle funzioni per la localizzazione indoor, pertanto sarà nostra cura monitorare gli sviluppi per valutare l'opportunità di integrare nuove soluzioni nel nostro progetto di ricerca.

Si precisa comunque che nel seguito si farà riferimento prevalentemente alle specifiche BLE relative alle versioni Bluetooth 4.x, in particolare alla versione 4.0, in accordo con le specifiche di funzionamento dei dispositivi utilizzati nelle sperimentazioni della presente ricerca. Sarà necessario attendere ancora un po' di tempo per poter osservare una significativa diffusione sul mercato di Beacon BLE operanti con versioni 5.x, in particolare con la recente 5.1. Tale cambiamento sarà certamente stimolato dai prossimi ritiri da parte del Bluetooth SIG, il quale ha già individuato il 01/02/2022 come data di ritiro della versione 4.0, mentre l'anno successivo toccherà alla versione 4.1.

4.4.1 Dispositivi Beacon BLE

Le specifiche Bluetooth Low Energy sono oggi utilizzate da diverse apparecchiature elettroniche, tra cui troviamo sicuramente i cosiddetti Beacon BLE. Si tratta di piccoli dispositivi elettronici wireless, a basso costo, aventi le dimensioni dell'ordine di una moneta, i quali trasmettono, con un intervallo programmabile, un modesto pacchetto di dati in modalità broadcast. Questi dispositivi, in grado di notificare la loro presenza ai ricevitori compatibili (es. smartphone) che si trovano nelle loro vicinanze (da pochi centimetri a qualche decina di metri), sono nati principalmente per fornire all'utente informazioni pubblicitarie, commerciali o culturali. In questi ultimi anni le applicazioni che vedono l'utilizzo dei Beacon BLE sono però cresciute notevolmente e tra i numerosi utilizzi si trovano anche quelli, in via di sviluppo, sulla localizzazione di oggetti e persone in ambienti chiusi. Nella figura seguente si riportano alcuni esempi di Beacon BLE, tratti dai siti dei rispettivi produttori.



Figura 4.11: esempi di Beacon BLE

Il classico Beacon BLE è in pratica un piccolo trasmettitore stand alone, operante a 2.4 GHz (GFSK²⁰), generalmente alimentato da una batteria al litio, che invia periodicamente un pacchetto di dati ad uno o più ricevitori dotati di un applicativo per l'interpretazione dei segnali ricevuti. L'hardware di questi dispositivi ha subito però nel tempo notevoli evoluzioni ed oggi possiamo facilmente trovare sul mercato Beacon dotati di uno o più sensori integrati (accelerometri, sensori di temperatura, di pressione, ecc.), che consentono di ampliare ulteriormente il già vasto ventaglio dei possibili utilizzi.

I Beacon impiegano 3 dei 40 canali BLE per trasmettere pacchetti informativi in modalità broadcast. Questi piccoli pacchetti di dati, definiti *advertising packets*, vengono inviati dal dispositivo ad intervalli programmabili che generalmente vanno da 100 a 5000 ms. La programmazione dell'intervallo tra una trasmissione e l'altra e la selezione della potenza di uscita (generalmente da -40 a +4 dBm) giocano naturalmente un ruolo fondamentale sul consumo energetico, pertanto questi parametri dovranno essere regolati sia in funzione delle specifiche esigenze applicative (latenza di aggiornamento e portata radio) sia in merito alle aspettative di durata della batteria.

I Beacon utilizzano le specifiche BLE, ma adottano dei pseudo standard (formati) a livello del campo dati. Questi formati sono stati definiti direttamente dalle aziende che hanno lanciato i dispositivi e le prime applicazioni. I produttori di Beacon possono comunque realizzare, in accordo con le specifiche BLE, nuovi formati proprietari per soddisfare specifiche applicazioni.

Si possono individuare tre formati principali, dei quali si riporta in figura 4.12 il relativo logo.



Figura 4.12: pseudo standard per dispositivi Beacon BLE

(nota: loghi e marchi appartengono ai rispettivi proprietari)

²⁰ Gaussian Frequency-Shift Keying (GFSK) è una tecnica di modulazione digitale di frequenza.

In generale la lunghezza dell'intero pacchetto (*advertising packet*) trasmesso dai Beacon BLE può arrivare a 47 byte, dei quali il segmento dati, che caratterizza lo specifico formato, può raggiungere i 31 byte. La figura 4.13 illustra l'*advertisement* con il segmento dati evidenziato in blu.

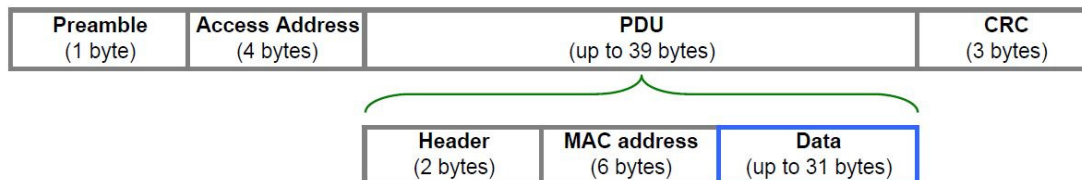


Figura 4.13: advertising packet relativo ai Beacon BLE, secondo specifiche Bluetooth 4.0 [F2]

Il *preamble* viene utilizzato dal ricevitore per la sincronizzazione della frequenza e la stima dei tempi, mentre la parte finale del pacchetto trasmesso, denominata CRC (*Cyclic Redundancy Check*), viene utilizzata, sempre dal ricevitore, per rilevare la presenza di eventuali errori nel codice e garantire l'integrità dei dati, quindi per convalidare o scartare l'intero pacchetto ricevuto. L'*header* contenuto nel PDU definisce invece la modalità di funzionamento del dispositivo, in relazione alla gestione delle eventuali risposte da parte del ricevitore e alla necessità di stabilire, oppure no, una connessione tra trasmettitore e unità ricevente. La seguente tabella 4.1, realizzata secondo quanto riportato nelle specifiche Bluetooth 4.x [F2], riporta le tipologie di trasmissione con le relative risposte consentite.

Advertising event type	PDU used	Allowable response PDU _s for advertising event	
		SCAN_REQ	CONNECT_REQ
Connectable Undirected Event	ADV_IND	YES	YES
Connectable Directed Event	ADV_DIRECT_IND	NO	YES*
Non-connectable Undirected Event	ADV_NONCONN_IND	NO	NO
Scannable Undirected Event	ADV_SCAN_IND	YES	NO

* Only the correctly addressed initiator may respond

Tabella 4.1: tipi di trasmissione; PDU utilizzato e PDU di risposta consentito (Bluetooth 4.x - Vol. 6, Parte B) [F2]

Si precisa che le versioni Bluetooth 5.x, in particolare la recente versione 5.1, hanno introdotto significative novità in merito alle specifiche BLE. Per una comprensione completa delle diverse versioni Bluetooth si rimanda al sito del Bluetooth SIG [F2].

Nel nostro progetto sono stati utilizzati tipici Beacon BLE (§ 5.1.1), i quali possono essere programmati a distanza via Bluetooth, ma durante il loro funzionamento operativo si comportano come semplici radio trasmettitori che inviano, in modalità unidirezionale, i dati memorizzati al loro interno. I ricevitori compatibili (smartphone), presenti nel raggio di copertura radio, potranno ricevere le informazioni trasmesse senza stabilire alcuna connessione con i trasmettitori, in pratica si avrà un tipico funzionamento in broadcasting.

Di seguito si riporta una breve descrizione del segmento dati (evidenziato in blu in figura 4.13) relativo ai formati iBeacon ed Eddystone, ritenuti più idonei per realizzare la nostra applicazione.

iBeacon [F15] - questo formato è stato ideato nel 2013 da Apple, praticamente la prima azienda ad adottare la tecnologia BLE per applicazioni con dispositivi Beacon.

In segmento dati del formato iBeacon occupa 30 byte. Dopo i primi 9 byte di preambolo vengono trasmessi 21 byte con i valori UUID, Major, Minor e RSSI a 1 metro, come rappresentato nella figura 4.14.

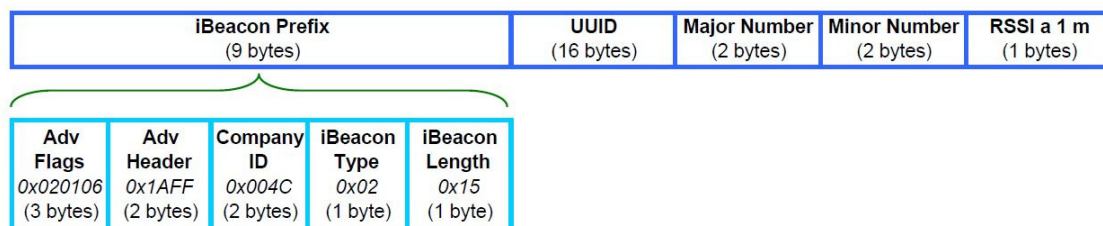


Figura 4.14: iBeacon packet [F15]

In relazione alla figura 4.14:

- Adv Flags (0x020106) - definisce il pacchetto come appartenente alle specifiche BLE (quindi incompatibile con il Bluetooth BR/EDR) con modalità di funzionamento in broadcasting;

- Adv Header (0x1AFF) - definisce la lunghezza e la tipologia dei dati successivi;
- Company ID (0x004C) - definisce l'identificativo del produttore;
- iBeacon Type (0x02) - definisce la tipologia del Beacon: ad esempio di prossimità;
- iBeacon Length (0x15) - definisce la lunghezza del pacchetto rimanente (21 byte);
- UUID - generalmente viene utilizzato per identificare in modo univoco tutta una serie di Beacon impiegati in una determinata applicazione;
- Major Number - può essere utilizzato per identificare un sottoinsieme di Beacon appartenenti all'insieme definito da UUID;
- Minor Number - può essere utilizzato per identificare un singolo Beacon;
- RSSI a 1 m - dato relativo al valore della potenza ricevuta ad un metro di distanza dal Beacon. Tale valore, memorizzato nel Beacon in fase di taratura, viene poi utilizzato dal nodo ricevente nella fase operativa per migliorare la stima delle distanze dai vari Beacon, calcolate con la tecnica RSSI vista precedentemente (§ 4.2.4).

Il formato iBeacon è supportato sia da dispositivi iOS che Android, ma in ogni caso per poter interpretare i dati di questo pseudo standard è richiesto che il ricevitore disponga di un applicativo con un apposito database, nel quale sono memorizzate le azioni da compiere o le informazioni da fornire all'utente in relazione ai dati numerici ricevuti.

L'applicativo, dopo una prima interpretazione dei dati, potrà indirizzare l'utente anche verso contenuti remoti, ad esempio verso una pagina web. Nella nostra applicazione invece ogni contenuto dovrà necessariamente essere già presente sullo smartphone, in quanto in galleria si ritiene inaffidabile realizzare download o connessioni a contenuti remoti.

Eddystone [F14] - si tratta di un formato open-source lanciato nel 2015 da Google in risposta al formato di Apple visto precedentemente, anche in questo caso le specifiche sono compatibili sia con Android che iOS. Diversamente dal precedente, questo formato si caratterizza principalmente per la definizione di diversi tipi di frame, i quali permettono di realizzare specifiche funzioni. Ad esempio il frame URL consente di inviare ai ricevitori direttamente un indirizzo web al quale connettersi, senza la

necessità di utilizzare un database per la comprensione di dati numerici, naturalmente è richiesta la disponibilità di un accesso internet.

La figura seguente illustra il segmento dati relativo al formato Eddystone.

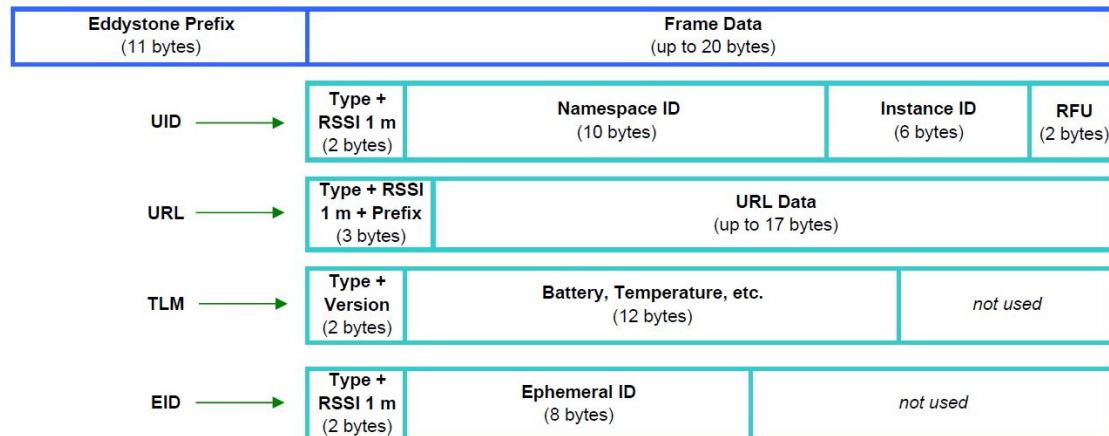


Figura 4.15: Eddystone packet [F14]

Come riportato in figura 4.15, dopo 11 byte di preambolo, si ha il segmento Frame che può arrivare a 20 byte, il quale può assumere diverse configurazioni a seconda dei pacchetti Eddystone utilizzati. I moderni Beacon generalmente dispongono di diversi slot di programmazione, pertanto sarà possibile utilizzare più configurazioni:

- il pacchetto UID, oltre alle informazioni iniziali, come il valore RSSI ad 1 metro, contiene il Namespace (10 byte) e l'Instance (6 byte), i quali svolgono rispettivamente funzioni simili all'UUID e al Major/Minor visti precedentemente nel formato iBeacon. Il segmento RFU è invece riservato ad usi futuri (Reserved for Future Use);
- il pacchetto URL, oltre ai dati iniziali, contiene il segmento URL Data che può raggiungere 17 byte e, come già detto, viene utilizzato per trasmettere l'indirizzo di un sito web ai dispositivi riceventi degli utenti;
- il pacchetto TLM consente invece di conoscere alcuni dati utili per il controllo del funzionamento e per la manutenzione del Beacon, ad esempio fornisce informazioni sulle condizioni della batteria e sulla temperatura all'interno del

dispositivo. Inoltre questo pacchetto risulta utile anche per operare con le API²¹ di Google;

- il pacchetto EID fornisce agli sviluppatori la possibilità di operare con l'API Google Proximity e di controllare quali utenti possono utilizzare i segnali emessi dai Beacon. L'ID del beacon cambia in modo pseudo casuale e può essere interpretato attraverso un sistema con chiave crittografata.

Come si è detto, la trasmissione in broadcasting di un Beacon sfrutta 3 dei 40 canali radio previsti dal protocollo BLE²². Tali canali sono stati individuati in modo da non interferire con i canali Wi-Fi più utilizzati, come illustrato nella figura 4.16.

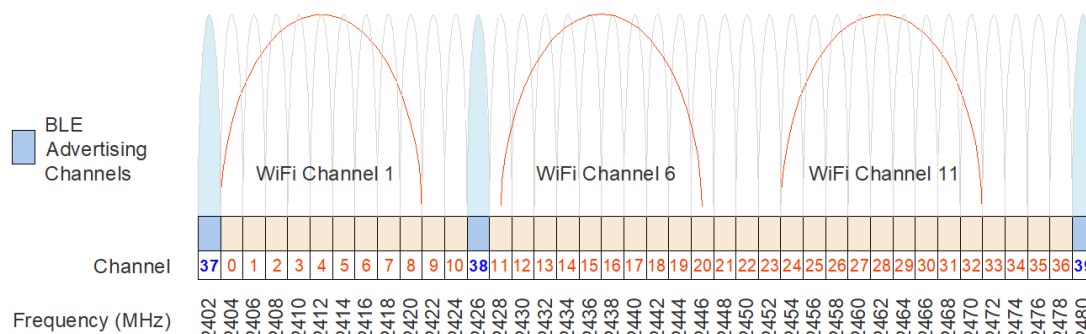


Figura 4.16: bande di frequenza e canali utilizzati nelle trasmissioni BLE e Wi-Fi

Ciò nonostante, in accordo con quanto evidenziato in diversi elaborati tecnici, tra cui quello di Lindh (2015) [E5], si ritiene che la vicinanza di sorgenti Wi-Fi (a causa delle spurie, sui canali laterali, dovute a trasmissioni RF non ideali) possa, in alcuni casi, disturbare le trasmissioni BLE di nostro interesse. Tali aspetti, e in generale i fenomeni di interferenza con altre emissioni elettromagnetiche, dovranno essere valutati attentamente nella realizzazione del sistema di localizzazione proposto in questo elaborato. A tal proposito si ritiene necessario approfondire sperimentalmente il comportamento in una moderna galleria autostradale.

²¹ API (Application Programming Interface) sono degli strumenti che le software house mettono a disposizione dei programmatori per rendere più semplice il loro lavoro nello sviluppo di applicazioni connesse con i loro software.

²² Canale 37 (2.402 GHz), canale 38 (2.426 GHz) e canale 39 (2.480 GHz).

Il pacchetto dati dei dispositivi BLE viene trasmesso periodicamente con un intervallo di tempo impostabile²³ (*Advertising Interval*), generalmente compreso tra 100 e 5000 ms. A tale intervallo viene poi aggiunto automaticamente un tempo di ritardo pseudo casuale tra 0 e 10 ms (*Advertising Delay*), finalizzato a ridurre la probabilità di collisioni persistenti tra i pacchetti trasmessi da due o più Beacon. La figura 4.17, elaborata secondo le specifiche Bluetooth 4.x [F2], illustra come gli intervalli degli eventi di trasmissione (*Advertising Event*) siano volutamente perturbati dal ritardo pseudo casuale.

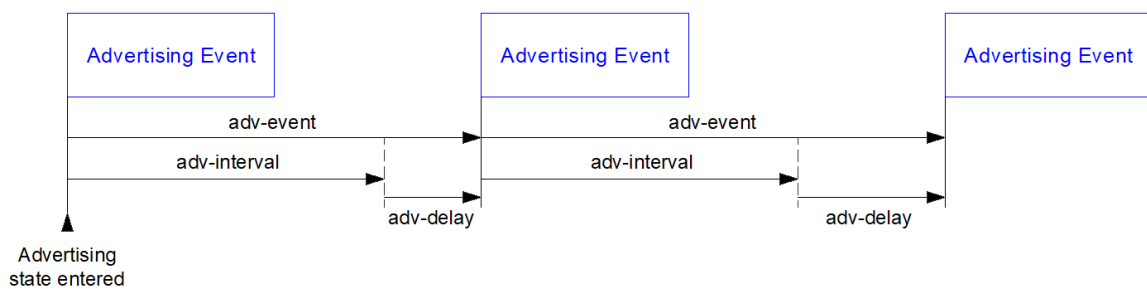


Figura 4.17: inserimento di un ritardo pseudo casuale per la riduzione delle collisioni tra i pacchetti trasmessi [F2]

Le collisioni sono comunque inevitabili e quando si verificano compromettono l'integrità dei dati, i quali vengono così scartati dal ricevitore; tali fenomeni causano quindi un aumento del tempo di lettura (*latenza di discovery*). In pratica il processo di lettura dei dati da parte del ricevitore è influenzato da una significativa componente probabilistica, affiancata a parametri ben definiti, quali l'intervallo di trasmissione, la lunghezza del pacchetto dati, l'intervallo di scansione e la finestra di scansione (questi ultimi due impostati sul ricevitore). Siamo nell'ambito delle prestazioni delle reti di radio comunicazione, richiamate brevemente solo per evidenziare alcuni aspetti di nostro interesse. In particolare si vuole sottolineare che la probabilità di incorrere in collisioni aumenta con l'aumentare del numero di Beacon e con il diminuire dell'intervallo di trasmissione. Ritenendo necessario considerare tali aspetti nello sviluppo del sistema proposto in questa ricerca, si reputa interessante riportare alcuni risultati tratti dalla pubblicazione di Ghamari et al. (2018), *Detailed Examination of a*

²³ Le specifiche BLE richiedono che l'*advertising interval* sia un multiplo intero di 0,625 ms, tale tempo deve essere inoltre compreso tra 20 ms e 10.24 s. Con trasmissioni *scannable undirected* e *non-connectable undirected* è però richiesto un intervallo minimo di almeno 100 ms.

Packet Collision Model for Bluetooth Low Energy Advertising Mode [E4], nella quale sono stati affrontati questi temi con sperimentazioni, simulazioni e con l'utilizzo di un modello probabilistico basato su una distribuzione di Poisson. In particolare è stata stimata la probabilità di collisione attraverso la seguente relazione, tratta, a sua volta, da un libro di Gebali (2008), *Analysis of computer and communication networks* [E3]:

$$P_c = 1 - e^{-N\lambda 2d_p} \quad (4.16)$$

dove:

N è il numero di Beacon BLE captati dal ricevitore;

λ è il numero medio di pacchetti trasmessi nell'unità di tempo = $1/(\text{advertising interval} + \text{advertising delay})$;

d_p è il tempo necessario a trasmettere un pacchetto di 47 byte (è stato considerato un tempo di 0.376 ms).

Nello studio è stato precisato che il modello si basa su ipotesi di semplificazione, tra cui l'assunzione di un *adv delay* costante, fissato a 5 ms.

Nella figura seguente si riporta un grafico sulla probabilità di collisione tratto dalla pubblicazione di Ghamari et al. (2018) [E4].

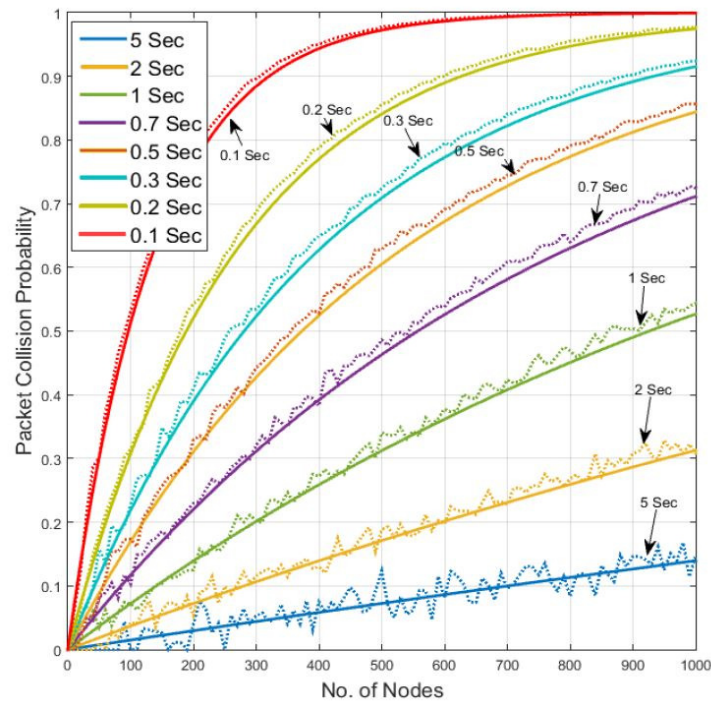


Figura 4.18: probabilità di collisione dei pacchetti dati, in relazione al numero di Beacon e all'intervallo di trasmissione
(linee continue: valori teorici - linee tratteggiate: valori ottenuti con simulazioni) [E4]

Dal grafico di figura 4.18 si può rilevare quanto appena detto, ovvero che la probabilità di collisione dei pacchetti, quindi la probabilità di ricevere dati corrotti che verranno scartati, aumenta significativamente con l'aumentare del numero di Beacon e con il diminuire dell'*advertising interval*. Come vedremo nella nostra applicazione, per ragioni di latenza, si dovrà operare con intervalli di trasmissione brevi, dell'ordine di 100 ms, ma si prevede che il numero di segnali Beacon che possono essere ricevuti contemporaneamente in un determinato punto della galleria non sia particolarmente elevato. Ipotizzando infatti di ricevere segnali significativi nel raggio di 25-30 m, ovvero relativi ad un tratto di 50-60 m di galleria, si stima un coinvolgimento di circa 20-25 dispositivi BLE. Applicando le soluzioni proposte da Ghamari [E4] a tali condizioni di funzionamento, si ottiene una probabilità di collisione dell'ordine dello 0.15 (15%). Si tratta di un valore ancora del tutto accettabile, in ogni caso si ritiene indispensabile valutare sperimentalmente il funzionamento dei dispositivi BLE direttamente in galleria. Inoltre si evidenzia che la recente versione Bluetooth 5.1 (§ 4.4) ha introdotto anche l'assegnazione pseudo casuale della successione di utilizzo dei tre canali di trasmissione, in modo da ridurre ulteriormente la probabilità di collisione tra i pacchetti dati, pertanto le nuove specifiche BLE consentiranno in futuro di contenere maggiormente l'aumento dei tempi di lettura in presenza di un numero elevato di Beacon.

Per ulteriori informazioni sulle specifiche e sulle caratteristiche BLE nelle varie versioni Bluetooth, si rimanda al sito ufficiale del Bluetooth SIG (<https://www.bluetooth.com>) [F2].

4.4.2 Beacon BLE nell'indoor positioning

Come si è accennato, le prime applicazioni con i Beacon BLE erano prevalentemente indirizzate a fornire informazioni commerciali o culturali di prossimità. In pratica l'utente interessato ad ottenere un certo tipo di informazione, dopo aver predisposto il proprio smartphone (generalmente installando un apposito applicativo), riceve notifiche e contenuti specifici quando si trova in prossimità di un determinato Beacon. Questo ambito applicativo è, ancora oggi, quello più sfruttato da questi dispositivi wireless, che con i loro servizi informativi di prossimità stanno pian piano conquistando numerose

attività, tra cui quelle di centri commerciali, grandi punti vendita, stazioni, aeroporti, musei e grandi chiese.

In questi ultimi anni i Beacon si stanno dimostrando interessanti anche in altri ambiti di utilizzo, tra cui quelli relativi alla localizzazione di oggetti e persone in ambienti chiusi [D2][D4][D5][D7][D11][F3][F7]. Come è noto l'indoor positioning è un campo di grande interesse che ha visto nel tempo il coinvolgimento di diverse tecnologie [D1][D12][D23][F4], ma ancora oggi, considerando le criticità di funzionamento tuttora presenti, si può ritenere un ambito scientifico in via di sviluppo.

Questi dispositivi bluetooth a bassa energia non risolvono certamente tutti i problemi di ranging e positioning che abbiamo visto nei paragrafi precedenti, ma sicuramente presentano interessanti vantaggi nelle applicazioni di localizzazione al chiuso. Grazie infatti ad una serie di caratteristiche, tra cui il basso costo, le piccole dimensioni, la semplicità di utilizzo e il modesto consumo energetico, risultano particolarmente idonei ad essere posizionati su oggetti o persone in movimento, da localizzare attraverso una rete wireless di ricezione ed elaborazione dei segnali. Un'architettura di questo tipo viene utilizzata in diversi ambiti, ad esempio a livello produttivo per monitorare la posizione di risorse materiali ed umane [F8]. I Beacon BLE risultano però interessanti anche nella realizzazione di sistemi di localizzazione simili al GPS, dove l'utente può individuare la sua posizione attraverso le informazioni visualizzate sul suo dispositivo ricevente, ovvero un comune smartphone. In questo caso, che è quello di nostro interesse, il punto di forza di questi dispositivi elettronici BLE è individuabile principalmente nella possibilità di realizzare, con costi sostenibili, un sistema di localizzazione basato su architetture con un numero consistente e ben distribuito di nodi fissi trasmettenti di riferimento (Beacon). In pratica il dispositivo ricevente, disponendo dei dati relativi alla planimetria dell'ambiente di navigazione e alla posizione in planimetria di ogni singolo Beacon BLE, sarà in grado, con un apposito applicativo, di auto localizzarsi nell'ambiente attraverso l'elaborazione dei segnali ricevuti dai dispositivi BLE (§ 4.3), in particolare attraverso la comparazione della potenza dei segnali ricevuti (RSSI). Naturalmente per consentire la funzione di positioning il segnale in radio frequenza, emesso da ogni singolo Beacon, dovrà necessariamente contenere un dato identificativo univoco (§ 4.4.1), che consenta al ricevitore di associare il segnale ricevuto alla posizione del dispositivo BLE che lo ha trasmesso.

Queste architetture, in determinati ambienti e applicazioni, possono presentare dei vantaggi in termini di affidabilità di funzionamento e accuratezza del posizionamento, pertanto i produttori di Beacon e gli sviluppatori dei software per l'IPS stanno iniziando a formulare le prime proposte commerciali di indoor positioning.

4.5 La localizzazione nelle gallerie stradali: studi e applicazioni esistenti

In generale, allo stato attuale, non si rilevano applicazioni di indoor positioning finalizzate a fornire funzioni di sicurezza nelle gallerie stradali. In particolare non si rilevano sistemi IPS basati su Beacon BLE per il supporto dell'esodo pedonale. Si segnala però la presenza di uno studio e di un'applicazione che, se pur diversi dal nostro progetto, presentano alcuni punti in comune con il sistema proposto.

4.5.1 Il Progetto SAVE ME

Si tratta di un progetto europeo realizzato dal 2009 al 2012, nel quale hanno partecipato diverse figure, tra cui in prima linea l'University Of Newcastle [F9][D18]. Il progetto SAVE ME non è molto conosciuto, inoltre alcuni riferimenti in rete non risultano più raggiungibili; sono comunque disponibili sufficienti informazioni sul sito del TRIMIS (Transport Research and Innovation Monitoring and Information System) riportato in bibliografia [F9]. Il progetto propone un vasto e complesso sistema per la gestione delle emergenze in molteplici ambienti, tra cui si richiamano anche le gallerie stradali. Nell'ambito dell'articolata proposta sono presenti anche aspetti di indoor positioning finalizzate a fornire informazioni alle persone sull'esodo, ma vista l'epoca si fa riferimento all'utilizzo di sistemi basati su architetture Wi-Fi tradizionali e non certo sui recenti Beacon BLE o su dispositivi simili. La documentazione disponibile fa riferimento anche ad alcune simulazioni, ma dalle informazioni reperibili sembrerebbe che, in merito al sistema di localizzazione, i risultati sul funzionamento sono stati modesti. Attualmente non risultano reperibili aggiornamenti o applicazioni reali.

4.5.2 Il Sistema Waze

Come è noto Waze è un'applicazione gratuita di navigazione stradale GPS per smartphone, sviluppata dall'azienda israeliana Waze Mobile e poi acquistata nel 2013

da Google. L'applicazione si è subito differenziata dai tradizionali navigatori GPS principalmente per la fornitura di informazioni sul traffico aggiornate direttamente dagli utenti. Recentemente Waze sta testando con diverse installazioni sul campo un sistema per estendere il funzionamento del navigatore stradale anche durante la guida all'interno delle gallerie [F12]. L'architettura del sistema Waze, anche se finalizzata alla navigazione veicolare, presenta dei punti in comune con il presente progetto di ricerca, in quanto prevede l'installazione di Beacon BLE lungo una parete di galleria, ma allo stato attuale non risultano indicazioni in merito a future applicazioni di sicurezza, in particolare nell'ambito del supporto all'esodo di emergenza. Le finalità di Waze, legate alla sola navigazione veicolare, sono al momento confermate anche dall'elevata distanza prevista tra i Beacon e dall'assenza di funzioni particolari legate all'esodo pedonale. Si ritiene che il sistema Waze, se pur diverso dal nostro progetto, rappresenti per la nostra ricerca un'ulteriore conferma sulla validità della tecnologia selezionata, basata appunto su dispositivi Beacon BLE.

5.0 CAPITOLO V - Sistema di indoor positioning con Beacon BLE, ottimizzato per il supporto dell'esodo pedonale nelle gallerie stradali

5.1 Individuazione del sistema

Come si è accennato nei capitoli introduttivi, la presente ricerca nasce con l'ambizione di portare un significativo contributo alla sicurezza nelle gallerie stradali attraverso il miglioramento prestazionale di uno o più sistemi elettrici o elettronici presenti in queste infrastrutture. Dopo una doverosa analisi della letteratura specifica, del quadro normativo e dello stato dell'arte dei sistemi tecnologici presenti in galleria, sono stati selezionati come particolarmente significativi per la sicurezza, nonché bisognosi di aggiornamento tecnologico, i sistemi preposti a supportare l'esodo pedonale. A tal proposito si è ritenuto interessante sviluppare un innovativo sistema di navigazione indoor, ottimizzato per l'ambiente galleria, da affiancare ai tradizionali sistemi di supporto attualmente previsti, quali ad esempio l'illuminazione e la segnalazione delle vie di esodo. Il sistema di indoor positioning (IPS) proposto, fruibile con un comune smartphone, è stato studiato principalmente per fornire all'utente informazioni dinamiche circa il miglior percorso (sicurezza e distanza) da seguire per abbandonare a piedi la galleria, sia in condizioni ordinarie che di emergenza.

Le soluzioni tecnologiche, le scelte progettuali, nonché le sperimentazioni sul campo, sono state caratterizzate da una visione particolarmente attenta all'affidabilità di funzionamento e alla sostenibilità economica del sistema; si è seguito in pratica un approccio RAMS, come illustrato nei paragrafi precedenti.

Sin dalle prime fasi del progetto si è cercato di tenere conto dei seguenti aspetti in relazione alle condizioni di galleria (ordinarie, degradate e di emergenza):

- affidabilità e disponibilità di funzionamento a diversi livelli prestazionali (es. localizzazione, indicazione delle distanze in gioco, informazioni sul percorso ottimale di esodo, ecc.);
- adeguatezza dei livelli di accuratezza e di latenza della localizzazione;
- affidabilità e disponibilità dell'alimentazione del sistema;
- utilizzo semplice ed intuitivo.

Per lo sviluppo dell'IPS è stata selezionata una tecnologia a radio frequenza basata su Beacon BLE, in quanto tali innovativi dispositivi elettronici presentano interessanti vantaggi rispetto alle WSN realizzate con architetture tradizionali poco distribuite. I principali vantaggi connessi con l'utilizzo di questi dispositivi si possono così riassumere:

- possibilità di realizzare sistemi a radio frequenza caratterizzati da sorgenti trasmettenti (nodi di riferimento) numerose ed estremamente distribuite nell'ambiente;
- elevata indipendenza funzionale dei singoli Beacon, anche in caso di perdita per guasto o incidente (incendio, urto, ecc.) di altri dispositivi costituenti il sistema;
- caratteristiche hardware e software relativamente semplici che si traducono positivamente in affidabilità di funzionamento;
- elevata fruibilità delle applicazioni con comuni smartphone compatibili bluetooth 4.0, sia con sistemi operativi Android che iOS;
- consumo energetico molto ridotto, caratteristica utile anche per gli aspetti relativi all'utilizzo di un'alimentazione di sicurezza autonoma, interna a ciascun Beacon;
- dimensioni e peso trascurabili che si prestano a numerose soluzioni di installazione;
- manutenzione relativamente semplice ed estremamente ridotta;
- possibilità di interagire facilmente con altre tecnologie per migliorare le prestazioni di localizzazione, ad esempio con sistemi inerziali e/o geomagnetici;
- possibilità, con contenute modifiche hardware e software, di programmare i singoli dispositivi in modo da modificare, in tempo reale, le informazioni fornite agli utenti;
- Basso costo complessivo.

Come vedremo, le caratteristiche dei Beacon, le prove sperimentali e l'approccio multidisciplinare, hanno consentito di individuare e sviluppare un sistema di localizzazione ottimizzato per l'ambiente di galleria. Tale ottimizzazione non si limita ad una classica funzione di indoor positioning, ma affronta funzioni avanzate in grado di guidare l'esodo dell'utente in relazione alle condizioni e agli scenari incidentali presenti o prevedibili in una galleria stradale.

5.1.1 I contatti con le aziende del settore, i Beacon e gli applicativi utilizzati

Dopo aver individuato il progetto di ricerca, nonché studiate le applicazioni BLE nel campo dell'indoor positioning, si è ritenuto necessario approfondire lo stato dell'arte dei dispositivi Beacon contattando direttamente alcune aziende di settore [F1][F3][F4]. A seguito dei contatti preliminari è emersa una particolare disponibilità da parte dell'azienda BlueUp S.r.l.s. di Colle Val d'Elsa (Siena) [F3], piccola realtà italiana, leader nella produzione e fornitura di Beacon BLE.

L'incontro in BlueUp e i successivi scambi informativi hanno consentito di confermare quanto già individuato nelle prime fasi della presente ricerca in merito ai vantaggi e alle criticità sull'utilizzo dei Beacon BLE nei sistemi di localizzazione indoor. In pratica i vantaggi principali risultano essere quelli riassunti nel paragrafo 5.1, mentre le criticità sono prevalentemente legate ai tipici fenomeni di propagazione del segnale, comuni comunque a tutti i sistemi radio operanti con frequenze dell'ordine del gigahertz, come descritto (§ 4.2.4) e ampiamente trattato in letteratura.

Nell'ottica di sfruttare al meglio i rilevanti aspetti positivi e considerando che il comportamento del segnale radio (dipendente dalle specifiche condizioni ambientali) risulta essere difficilmente modellabile, si è ritenuto opportuno realizzare una serie di sperimentazioni atte ad individuare e valutare un'architettura di sistema ottimizzata per l'ambiente e per le funzioni necessarie in galleria. A tal proposito l'azienda BlueUp si è resa disponibile a fornire, ad un costo contenuto, sia i dispositivi Beacon, che alcuni applicativi per realizzare i test sperimentali.

Sono stati forniti due modelli di Beacon; n° 20 dispositivi tipo BlueBeacon Forte e n° 10 dispositivi BlueBeacon Mini. I primi sono stati utilizzati in quasi tutte le prove, compresa la sperimentazione in galleria, mentre i secondi sono stati utilizzati esclusivamente per alcuni brevi test preliminari eseguiti all'interno della Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale della Sapienza di Roma. In ogni caso le due versioni di Beacon presentano pressoché le stesse caratteristiche, in quanto si differenziano principalmente per il contenitore e per la capacità (mAh) della batteria. Si è deciso di passare all'utilizzo dei dispositivi BlueBeacon Forte, in particolare in galleria, in quanto questo modello è provvisto di un contenitore particolarmente robusto, con grado di protezione IP 65, che garantisce la non penetrabilità a polvere e getti d'acqua. Inoltre il modello Forte dispone di una batteria al litio da 1500 mAh, rispetto ai 1000 mAh del

modello Mini. Di seguito le immagini dei due modelli utilizzati, prodotti da BlueUp [F3].



Figura 5.1: Beacon BLE forniti da BlueUp [F3]

La tabella seguente riporta la scheda tecnica, fornita dal produttore, del modello Forte.

Device specifications	
Electrical specifications	
Core module	Nordic nRF51822 SoC (MCU and radio transceiver)
MCU core	ARM Cortex-M0 32-bit CPU
Current consumption	Radio TX: 8mA (@ 0dBm) Radio RX: 9.7 mA Idle mode: 3 uA Sleep mode: 1.5 uA
Radio specifications	
Standard	Bluetooth 4. 0 (Bluetooth Low Energy or Bluetooth Smart)
Frequency band	2.402 to 2.480 GHz (according Bluetooth 4.0 specifications, worldwide ISM band)
Advertising channels	CH37 (2.402 GHz), CH38 (2.426 GHz), CH39 (2.480 GHz) (according Bluetooth 4.0 specifications)
Channel spacing	2 MHz (according Bluetooth 4.0 specifications)
TX power	Conducted: +4 dBm (max) EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power): +6 dBm (max)
Antenna	
Type	Integrated meandered planar inverted F-antenna (PIFA)
Gain	2dB (max.)
Radiation diagram	Omnidirectional
Power	
Power supply	Battery
Replaceable	Yes
Type	CR17345 (3V, lithium)
Model	Panasonic Industrial CR123A (typical capacity 1500 mAh @ 25°C)
Expected life	11 months to 8 years, 24/7 at ambient temperature 2.5 years with default settings

segue tabella

Mechanical specifications						
Material	Polycarbonate plastic					
Color	Light grey RAL7035 (silk-screen printing available on demand)					
Size	50 x 52 x 35 mm					
Wall fastening	Screws (invisible wall-mounting within the base part), silicone glue, double side tape					
Opening	Front cover with screws					
Protection	IP65 / NEMA4					
Flammability	UL 94 HB					
Environmental specifications						
Operating temperature	-40°C to +75°C (battery operating life sharply decreases under -10°C)					
Storage temperature	-40°C to +85°C (without battery)					
Certifications						
CE (Directive 1995/5/CE R&TTE, 2011/65/UE RoHS2) iBeacon, Eddystone, Quuppa						
Advertising						
Up to 4 slots configurable for Eddystone frame types: UID, URL, TLM, EID. Full support for specifications Eddystone Configuration GATT Service by Google						
Up to 4 slots configurable for the following frame types: iBeacon, Quuppa, Sensors						
TX power	-40, -30, -20 to 4 dBm (with 4dB steps). Programmable for each slot					
Advertising interval	0.1 to 5 secs. Programmable for each slot					
Global configuration options	non-connectable mode, anonymous mode, programmable time period, locked/unlocked mode, change password					
Default settings						
Eddystone-URL: URL = https://www.blueupbeacons.com , ADV interval = 1000 msec, TX power = -8dBm						
iBeacon: UUID = ACFD065E-C3C0-11E3-9BBE-1A514932AC01, major = 0, minor = S/N, ADV interval = 400 msec, TX power = -8dBm						
Global configuration	connectable, locked					
Expected battery life-time (in months)						
TX power	Advertising interval					
	100 msec	300 msec	500 msec	700 msec	1000 msec	5000 msec
0 dBm	11	28	41	50	62	102
-8 dBm	12	30	43	53	65	104
-20 dBm	13	32	46	57	68	106

Tabella 5.1: scheda tecnica del dispositivo BlueBeacon Forte [F3]

Il modello Mini, come si è accennato, si differenzia dal modello Forte per le caratteristiche del contenitore e della batteria; quest'ultima, essendo di minore capacità, influisce sulla durata stimata di funzionamento, che a sua volta dipende anche dalla potenza e dall'intervallo di trasmissione. Di seguito, in tabella 5.2, si riportano solo i dati del dispositivo Mini che si differenziano da quelli del Beacon Forte visti in tabella 5.1.

Power						
Power supply	Battery					
Replaceable	Yes					
Type	CR2477 (3V, lithium)					
Model	EEMB or equivalent (typical capacity 1000 mAh @ 25°C)					
Expected life	6 months to 5 years, 24/7 at ambient temperature 18 months with default settings					
Mechanical specifications						
Material	ABS plastic					
Color	White (silk-screen printing available on demand; custom color on demand)					
Size	40 x 40 x 15 mm					
Wall fastening	Double-sided tape or dual-lock					
Opening	Back cover with screws					
Protection	IP40					
Flammability	UL 94 HB					
Environmental specifications						
Operating temperature	-20°C to +60°C (battery operating life sharply decreases under 0°C)					
Storage temperature	-40°C to +85°C (without battery)					
Expected maximum battery life-time (in months)						
TX power	Advertising interval					
	100 msec	300 msec	500 msec	700 msec	1000 msec	5000 msec
0 dBm	6	17	24	30	36	58
-8 dBm	7	18	25	31	37	59
-20 dBm	8	19	27	33	39	60

Tabella 5.2: caratteristiche del dispositivo Mini che si differenziano da quelle del dispositivo Forte [F3]

Come si evince dalle caratteristiche, ambedue i dispositivi permettono configurazioni multiple sia nel formato iBeacon che Eddystone (4 slot per ciascun formato), inoltre sono impostabili numerosi livelli di potenza (da -40 dBm a +4 dBm) e di intervallo di trasmissione (da 100 ms a 5000 ms), in modo da consentire di calibrare al meglio la portata radio e la latenza di aggiornamento, in relazione alla durata della batteria e alle esigenze della specifica applicazione.

In genere i Beacon BLE, come la maggior parte dei dispositivi elettronici, vengono forniti dai produttori con una programmazione di base dichiarata; BlueUp fornisce i suoi dispositivi con la configurazione di default indicata in tabella 5.1, ma generalmente tale configurazione deve essere modificata per assolvere correttamente alle funzioni richieste dalla specifica applicazione. Per modificare i parametri di default occorre collegarsi al Beacon con uno smartphone compatibile, utilizzando un apposito applicativo fornito dal produttore e generalmente disponibile sia su Play Store che su

App Store. Nel nostro caso BlueUp ci ha indicato due applicativi per operare con i suoi dispositivi: *BlueBeacon Manager App* e *BlueBeacon Navigator Demo*, i quali sono identificati sul Play Store con le icone riportate nella seguente figura.

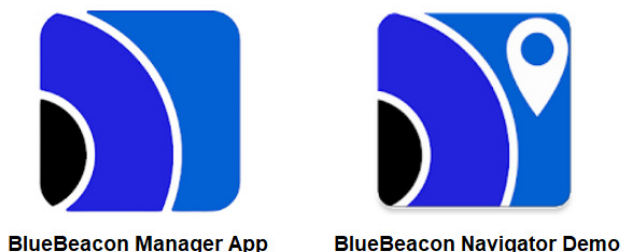
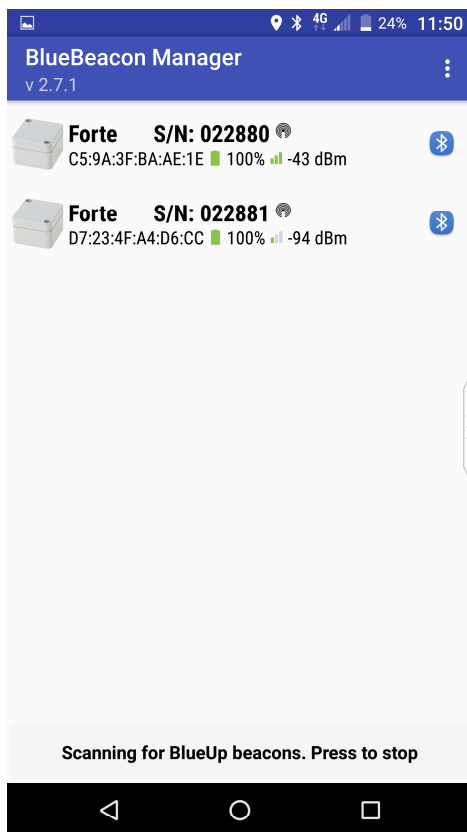


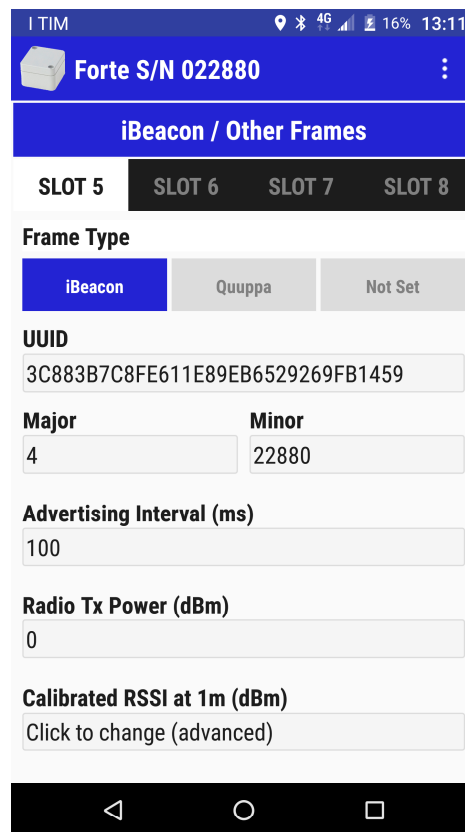
Figura 5.2: icone di due applicazioni di BlueUp per operare sui loro Beacon BLE [F3]

BlueBeacon Manager App consente di rilevare i Beacon e di connettersi in Bluetooth a ciascun dispositivo, in modo da poter modificare i parametri di default ed eventualmente programmare gli altri slot disponibili. Inoltre l'applicativo fornisce la potenza in dBm del segnale ricevuto da ciascun Beacon. L'accesso ad ogni singolo Beacon è protetto da una password di default, la quale può naturalmente essere modificata dal programmatore finale. In figura 5.3 si riportano due immagini di esempio dell'applicazione (screenshot dello smartphone); la prima schermata raffigura la pagina di rilevazione dei dispositivi, dove compaiono i dati relativi a due BlueBeacon Forte presenti nel raggio di portata, mentre la seconda schermata raffigura la pagina di programmazione di uno dei dispositivi individuati. In questo caso la sezione di programmazione è relativa allo slot n° 5 del formato iBeacon.

In una buona parte delle sperimentazioni illustrate nel presente progetto, al fine di semplificare l'interpretazione dei dati che identificano ogni singolo Beacon, il Major Number e il Minor Number sono stati impostati seguendo il numero di serie assegnato al dispositivo dal produttore. Ad esempio il Beacon S/N 04/022894, se non necessitava programmazioni diverse, è stato programmato con Major 4 e Minor 022894.



Schermata rilevazione dispositivi



Schermata di programmazione iBeacon - slot 5

Figura 5.3: schermate di esempio, relative all'applicazione BlueBeacon Manager App di BlueUp [F3]

Si evidenzia che i Beacon BLE utilizzati nella sperimentazione, oltre che con appositi applicativi per comuni smartphone, possono essere interrogati e programmati via Bluetooth anche attraverso l'utilizzo di appositi dispositivi fissi di comunicazione, definiti Gateway BLE, i quali consentono un raggio operativo molto ampio, anche fino a 100-200 m in spazio libero. Nella nostra sperimentazione non abbiamo avuto la necessità di utilizzare Gateway BLE, ma tali dispositivi saranno in seguito richiamati in quanto possono trovare utilizzo nell'applicazione di questo progetto di ricerca.

BlueBeacon Navigator Demo è invece un software dimostrativo utilizzato dall'azienda per testare il comportamento dei propri dispositivi in applicazioni, in via di sviluppo, di indoor positioning. Grazie a tale software e alla disponibilità di BlueUp è stato possibile preparare ed eseguire la nostra sperimentazione in galleria, evitando di investire risorse per lo sviluppo di un software IPS di test.

Come vedremo più avanti, l'applicativo *BlueBeacon Navigator Demo*, realizzato da Nextome S.r.l. [F7] per BlueUp [F3], consente diverse tarature e l'utilizzo di numerosi filtri per compensare gli errori RSSI e ottimizzare la funzione di positioning. Il *BlueBeacon Navigator*, se pur dimostrativo, è frutto delle profonde conoscenze di Nextome nel campo dei software di navigazione indoor. Tale applicativo, basato su un algoritmo proprietario di multilaterazione pesata, consente di utilizzare un insieme di filtri (alcuni dei quali brevettati da Nextome), nonché il supporto di tecniche inerziali e magnetiche. Si anticipa comunque che nella sperimentazione di galleria si sono ottenuti risultati soddisfacenti anche utilizzando impostazioni di base con il solo contributo del *particles filter*, che consente di scartare i segnali fuori scala in accordo con i limiti dimensionali di planimetria.

L'applicativo di navigazione, essendo dimostrativo, non consente di memorizzare la planimetria e i dati relativi ai Beacon direttamente sullo smartphone; per utilizzare l'applicazione è infatti richiesto il download delle informazioni di navigazione da un server remoto di BlueUp. Pertanto è stato necessario ricorrere alla disponibilità dell'azienda per abilitare il navigatore indoor e per eseguire l'upload dei nostri dati sul loro server remoto. In pratica, prima dei test, è stato necessario posizionarsi nel raggio di portata di almeno un Beacon per consentire all'applicativo di riconoscere il dispositivo e di eseguire un breve download internet dell'ambiente di navigazione associato. Tale procedura richiede una breve connessione internet, ma naturalmente è da intendersi limitata ai soli test sperimentali, in quanto risulta ovvio che in un utilizzo reale l'utente di galleria dovrà disporre di un'applicazione immediatamente funzionante con tutti i dati già memorizzati sul proprio smartphone, in modo da non necessitare di download e di connessioni di alcun tipo. Tali aspetti saranno comunque ripresi nei paragrafi successivi.

Nei test sperimentali, oltre ai due applicativi appena citati, è stata utilizzata anche l'applicazione gratuita *BLE Analyser*, realizzata da Keuwlsoft (<http://www.keuwl.com>) [F6]. Tale applicazione è risultata particolarmente utile per le misure relative alla potenza del segnale ricevuto, in quanto, tra gli interessanti strumenti offerti dal software, è disponibile una pratica interfaccia in grado di restituire, in un determinato arco di tempo, il valore medio, il valore minimo e quello massimo della potenza

ricevuta in dBm. Di seguito, in figura 5.4, si riporta una schermata dell'app durante una misurazione effettuata su dispositivi BlueBeacon Forte.



Figura 5.4: schermata dell'app BLE Analyser (<http://www.keuwl.com>) [F6], relativa alla misura della potenza ricevuta da due dispositivi BlueBeacon Forte

In riferimento alla figura 5.4, si precisa che i valori medi RSSI (-73.1 e -76.7 dBm), relativi ai due Beacon, sono stati calcolati su un tempo di scansione di 10 secondi. Tenendo conto che l'intervallo di trasmissione (advertising interval) dei Beacon è stato impostato a 100 ms, il valore medio risulta relativo a ben 100 letture istantanee. Il tempo di scansione di 10 secondi è stato scelto sia per facilitare le letture sia per osservare meglio il comportamento radio nei vari ambienti, proprio in considerazione della significativa aleatorietà insita nell'indicatore RSSI. Occorre però precisare che le applicazioni di navigazione indoor devono fornire veloci aggiornamenti posizionali, pertanto sono chiamate ad operare con tempi di scansione brevi, generalmente dell'ordine di 0.3-0.5 s. Viste le elevate oscillazioni intorno al valore medio, una finestra di scansione breve può esporre la tecnica RSSI ad errori di stima maggiori, che possono però essere in parte compensati da algoritmi avanzati, basati ad esempio su medie pesate e su tagli di segnale [F7].

Questi aspetti saranno ripresi in seguito, in ogni caso, al fine di poter osservare le differenze sulla stima dell'indicatore RSSI, sono stati eseguiti anche alcuni test (es. figura 5.6) con un tempo di scansione di 1 s, più vicino alle impostazioni utilizzate generalmente negli applicativi di navigazione indoor.

5.2 Test preliminari sul comportamento dei Beacon

Come si è evidenziato nell'introduzione del presente elaborato, lo scopo di questa ricerca non è studiare nuove tecniche di indoor positioning, ma bensì sfruttare lo stato dell'arte dei sistemi di localizzazione per individuare e sviluppare architetture e accorgimenti in grado di operare con fidatezza in una particolare applicazione di sicurezza indirizzata alle gallerie stradali.

Focalizzando l'interesse sui Beacon BLE, quali dispositivi su cui basare il sistema di localizzazione, si è ritenuto necessario effettuare una serie di test sperimentali, sia per familiarizzare con questi innovativi congegni, sia per approfondire sul campo il loro comportamento radio. Nei test preliminari sono stati studiati prevalentemente i valori di potenza ricevuta (RSSI) in relazione alle distanze in gioco, all'ambiente e alle condizioni di utilizzo, in modo da toccare con mano le criticità conosciute in letteratura e poter individuare soluzioni ottimali per l'ambiente di galleria. Sempre a livello preliminare, prima di spostarsi in ambiente galleria, sono stati realizzati anche dei test di indoor positioning, utilizzando un locale messo a disposizione dalla Sapienza di Roma.

5.2.1 In esterno, senza ostacoli

Al fine di poter comprendere al meglio gli aspetti teorici trattati nel capitolo IV e nel contempo ottenere un comportamento radio, poco disturbato, da confrontare con i successivi test in ambienti chiusi, si è ritenuto opportuno realizzare una serie di misure in esterno, senza pareti e ostacoli particolarmente significativi ai fini della propagazione del segnale radio (con esclusione del terreno e della presenza dell'operatore).

I test, realizzati sulle colline di Genova, sono stati eseguiti utilizzando dispositivi BlueBeacon Forte posizionati su cavalletti telescopici. Per la realizzazione di queste prove i Beacon sono stati posti a diverse altezze da terra, come indicato nelle condizioni sperimentali riportate nei successivi grafici.

Le misure RSSI sono state eseguite prevalentemente utilizzando l'applicativo *BLE Analyser* installato su uno smartphone BlackBerry modello Priv, ma sono state eseguite e riportate anche alcune misure di confronto con altri modelli di smartphone. Si precisa inoltre che il BlackBerry Priv è stato utilizzato con la tastiera fisica scorrevole in posizione chiusa.

Durante le prove lo smartphone è stato tenuto ad un'altezza da terra di circa 1 metro, utilizzando prevalentemente un cavalletto telescopico con supporto in materiale plastico, in modo da evitare interferenze sul segnale. Sono stati però eseguiti dei test di confronto assegnando direttamente all'operatore il compito di tenere lo smartphone con due dita e poi con l'intera mano. In figura 5.5 si riporta un'immagine relativa alla preparazione dei test, dove si può notare il Beacon e lo smartphone posizionati sui cavalletti telescopici, nonché il nastro metrico posato sul terreno per la misura della distanza tra i due dispositivi.



Figura 5.5: preparazione dei test in esterno

Di seguito si riportano le impostazioni selezionate per i dispositivi BlueBeacon Forte:

- Formato BLE: iBeacon
- UUID: 3C883B7C8FE611E89EB6529269FB1459
- Major: 4
- Minor: 022892 (Beacon A); 022893 (Beacon B); 022894 (Beacon C)
- Advertising Interval: 100 ms
- Radio Tx Power: 0 dBm

- RSSI a 1 m di distanza: deducibile dai grafici (non è necessario impostare questo parametro nelle fasi di misura dei valori RSSI).

Si è deciso di utilizzare il formato iBeacon, in quanto si ritiene più idoneo per la trasmissione dei dati necessari all'applicazione di galleria che vedremo in seguito.

Il parametro UUID, come si è detto in precedenza, associa generalmente il dispositivo BLE ad una determinata applicazione; tale impostazione non è di interesse in questo specifico test sulla potenza ricevuta, ma si è mantenuta la programmazione prevista per i successivi test di localizzazione.

Il Major e il Minor consentono rispettivamente di identificare un sottogruppo e il singolo Beacon all'interno di un'applicazione, in ogni caso l'applicativo *BLE Analyser* individua i dispositivi attraverso il numero seriale del produttore.

L'advertising interval è stato impostato al minimo tempo consentito (100 ms), in modo da ottenere 100 letture in 10 secondi di scansione (oppure 10 letture in 1 secondo, nel caso del test di confronto di figura 5.6).

La potenza di trasmissione è stata impostata vicina al valore massimo, ovvero a 0 dBm, in base a misure preliminari e alle indicazioni fornite da BlueUp.

L'RSSI a 1 metro, come si è visto (§ 4.2.4), è invece un parametro di riferimento che viene trasmesso al ricevitore per essere utilizzato negli algoritmi di stima della distanza dal Beacon. Occorre quindi impostare il valore ottimale (valore medio ricevuto in base alle caratteristiche del Beacon, del ricevitore e dell'ambiente) quando si utilizzano applicazioni che necessitano di tale riferimento; nei test finalizzati alla misura dei valori RSSI la trasmissione di tale informazione non riveste quindi particolare utilità.

Di seguito si riportano due test (figure 5.6 e 5.7) sui valori RSSI, in relazione alla distanza del ricevitore dal Beacon. Il primo test è relativo alle letture ottenute posizionando il Beacon a 1 metro da terra, mentre nel secondo il dispositivo trasmittente è stato posto ad un'altezza dal terreno di 2 metri.

Si precisa che nella prova a 2 metri il Beacon è stato ruotato, posizionando l'antenna integrata verso il basso. In questo modo, quando il ricevitore si trova sotto il Beacon stesso a meno di un metro di distanza, si evita una minima schermatura del segnale da parte della generosa batteria interna al dispositivo BLE.

Nei grafici si riporta anche l'orientamento dello smartphone e la posizione assunta dall'operatore durante le prove (vista dall'alto). Si precisa che le misure a distanza zero dal Beacon sono state in realtà rilevate a circa 10 cm dal dispositivo o dall'asta di supporto, rispettivamente nel caso del Beacon posizionato a 1 m, oppure a 2 m dal terreno.

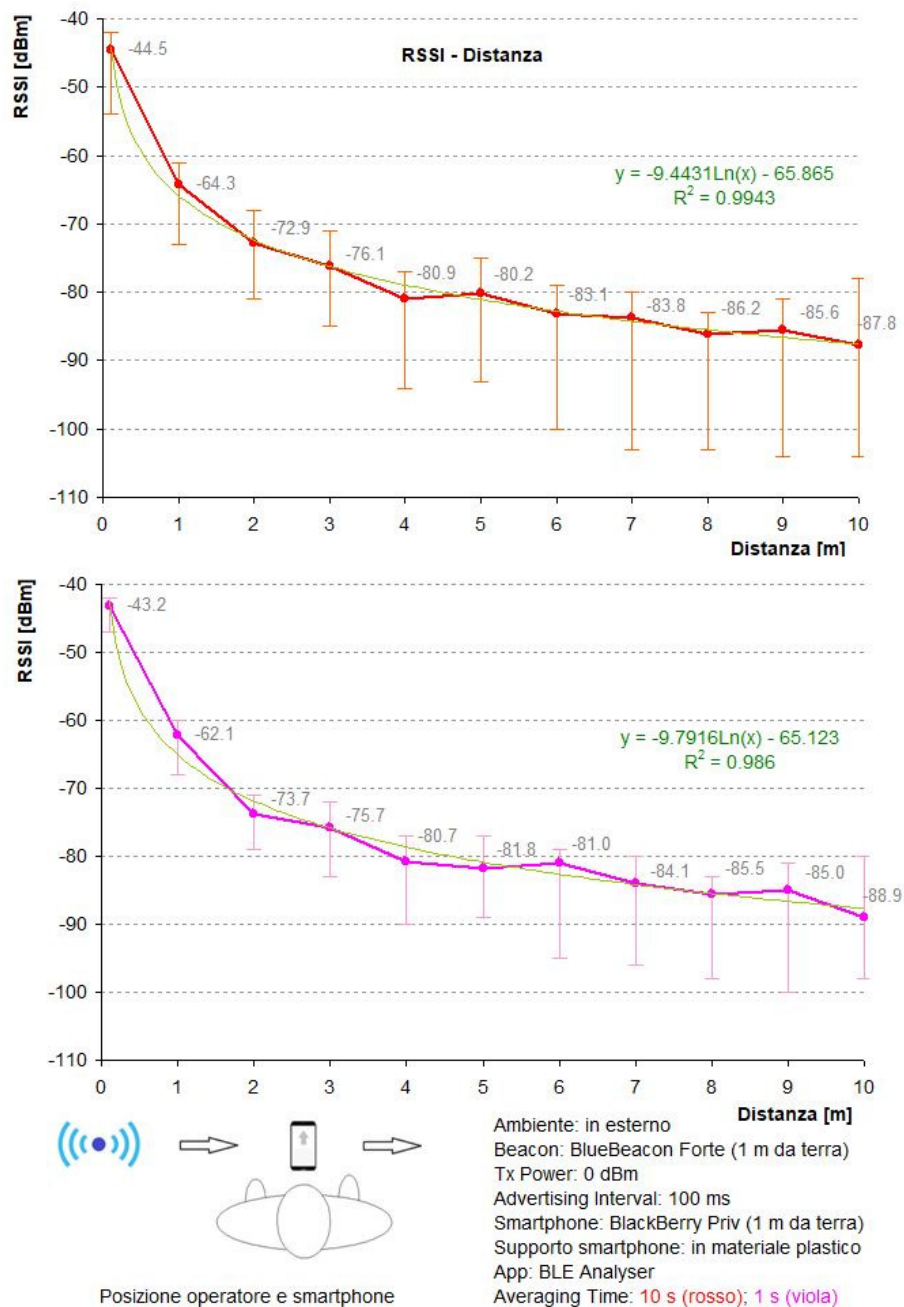


Figura 5.6: misure RSSI in esterno (test n° 1)

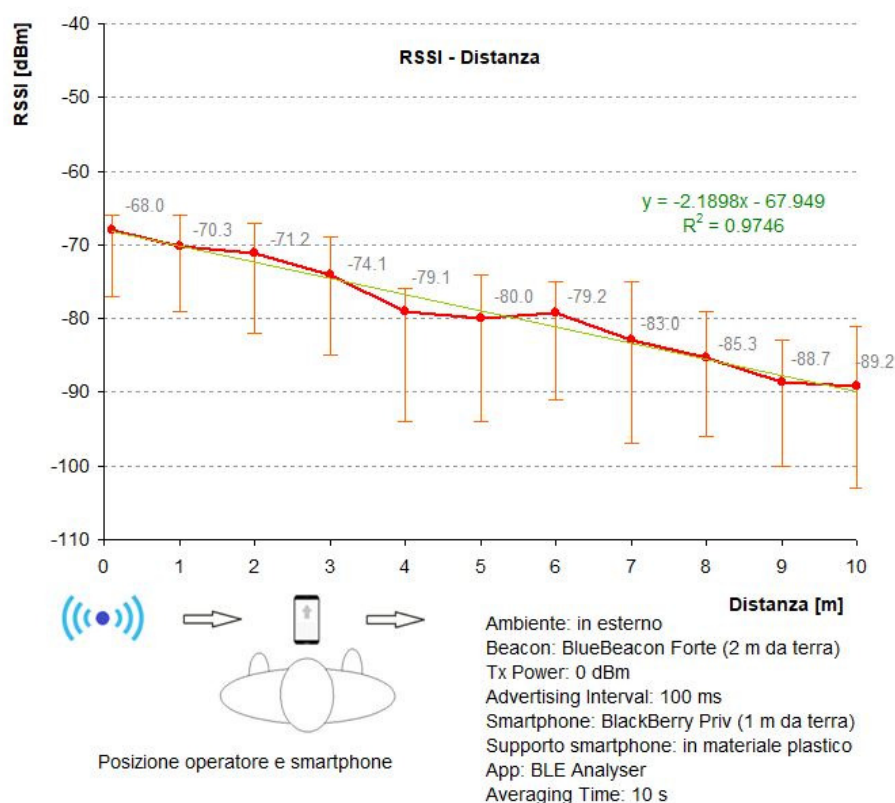


Figura 5.7: misure RSSI in esterno (test n° 2)

Il test n° 1 (figura 5.6) è stato eseguito con due tempi di scansione (10 s e 1 s) per poter osservare anche l'influenza del numero di letture sul valore medio. I risultati, pur considerando le elevate oscillazioni intorno al valore medio, hanno restituito un comportamento non troppo distante da quello ideale visto nel paragrafo 4.2.4. In particolare la curva rossa, relativa a 100 letture, presenta un andamento migliore, ma anche con 10 letture (curva viola) l'andamento non presenta elevate differenze.

Il grafico del test n° 2 (figura 5.7) presenta invece una curva con evidente appiattimento della sua porzione iniziale, in quanto aumentando l'altezza da terra del Beacon, per ovvi motivi geometrici, aumentano le distanze in gioco e si realizza un allontanamento più graduale dello smartphone dal dispositivo trasmittente. Ciò nonostante, il posizionamento dei Beacon ad altezze elevate comporta alcuni vantaggi di propagazione, in particolare elimina o riduce l'instaurarsi delle temute condizioni *NLOS* (No Line of Sight), in pratica quelle condizioni che si presentano quando oggetti o persone, trovandosi tra il trasmettitore e il ricevitore, interrompono la linea ottica di propagazione del segnale radio. Quest'aspetto, a seconda delle esigenze applicative,

induce generalmente i produttori di Beacon e gli sviluppatori di software per IPS a consigliare installazioni ad altezze dell'ordine di 3-4 m. A tal proposito, si anticipa che anche per il nostro sistema di galleria si prevede un'installazione ad altezze simili, proprio per limitare l'instaurarsi di tali condizioni di propagazione, ma a scopo di confronto, nonché ambire ad una visione più completa dei fenomeni in gioco, saranno eseguiti test anche ad altezze d'installazione inferiori.

A questo punto si è ritenuto opportuno eseguire ulteriori prove sulla propagazione del segnale radio, in modo da comprendere l'entità dei seguenti fenomeni:

- influenza del corpo dell'operatore;
- influenza della mano dell'operatore;
- influenza dell'orientamento dello smartphone;
- differenza di sensibilità di ricezione tra diversi modelli di smartphone;
- omnidirezionalità del segnale trasmesso.

Di seguito i risultati del test relativo all'influenza della posizione dell'operatore sul segnale ricevuto (figura 5.8). Il test è stato eseguito posizionando il Beacon a 3 diverse altezze da terra: 1, 2 e 3 metri.

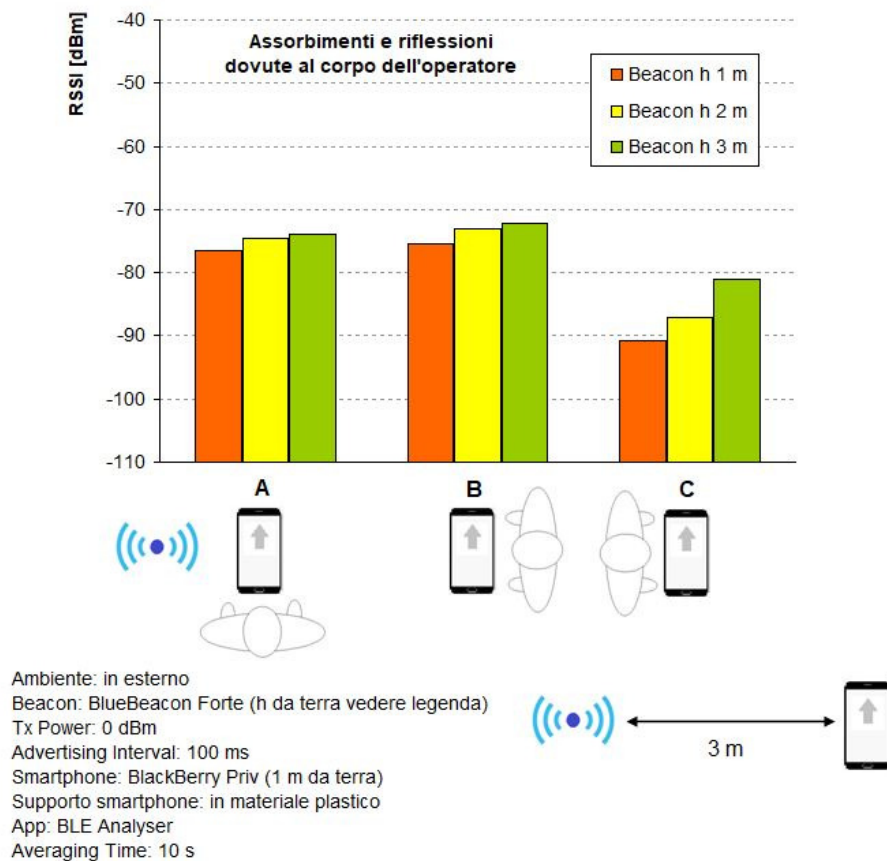


Figura 5.8: misure RSSI in esterno (test n° 3)

Il test n° 3 (figura 5.8), realizzato ad una distanza sul terreno di 3 m dal Beacon, evidenzia che la posizione dell'operatore influenza il valore RSSI. In particolare nella posizione B si ha un lieve aumento di potenza, probabilmente per un effetto di riflessione, mentre nella posizione C si rileva una forte attenuazione del segnale, a causa della schermatura dovuta al corpo dell'operatore posizionato tra il trasmettitore e il ricevitore. Come era prevedibile il test evidenzia che per ridurre l'effetto schermante occorre aumentare l'altezza da terra del Beacon; in pratica risulta necessario evitare le condizioni di propagazione *NLOS* (No Line of Sight), ma un'altezza eccessiva rende più difficoltoso utilizzare il parametro RSSI per la stima delle distanze in gioco.

Si sottolinea inoltre che anche la distanza dell'operatore dallo smartphone influenza il segnale ricevuto, per tale motivo durante tutti i test sul valore RSSI si è cercato, nei limiti del possibile, di mantenere la stessa distanza, ovvero circa 10-15 cm.

Nel grafico successivo si riportano invece i risultati del test relativo all'influenza della mano dell'operatore (figura 5.9). In tale prova si è voluto confrontare il valore RSSI in tre diverse situazioni:

- A) smartphone tenuto in posizione con un cavalletto telescopico dotato di supporto in materiale isolante;
- B) smartphone tenuto direttamente dall'operatore con due sole dita;
- C) smartphone tenuto direttamente dall'operatore con l'intera mano.

Il test è stato ripetuto con tre diversi modelli di smartphone: BlackBerry Priv, Huawei P8 Lite e Samsung Galaxy S III.

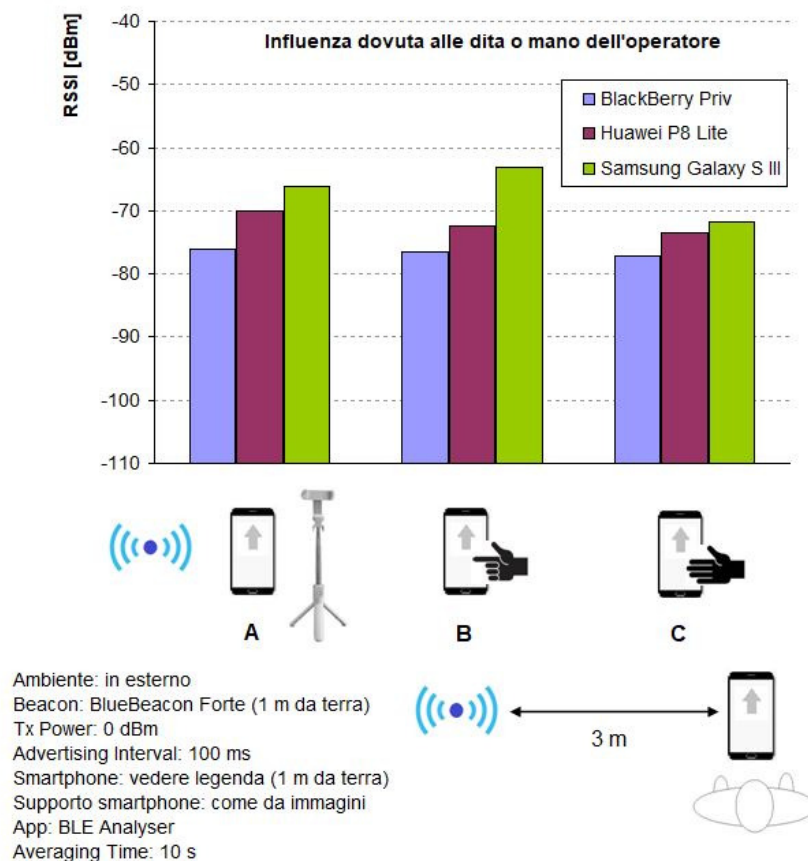


Figura 5.9: misure RSSI in esterno (test n° 4)

Il grafico (test n° 4, figura 5.9) evidenzia che anche la mano dell'operatore influenza la ricezione del segnale. Tale influenza assume comportamenti diversi in relazione alle caratteristiche dello smartphone, ad esempio in base alla posizione interna dell'antenna. Il BlackBerry Priv, pur restituendo valori RSSI mediamente più bassi, presenta una minore sensibilità alla mano dell'operatore, infatti il massimo effetto schermante si

attesta intorno a 1 dBm. Mentre il Samsung S III, a fronte di una ricezione mediamente più performante, presenta una significativa sensibilità alla posizione della mano, infatti con l'utilizzo del supporto plastico si ottiene una ricezione di potenza significativamente più elevata (oltre 5 dBm) rispetto a quella ottenuta con la presenza schermante dell'intera mano. Si segnala inoltre che trattenendo il Samsung (nella parte inferiore) con due sole dita è stato registrato, in controtendenza, un aumento dell'RSSI. Tale effetto è probabilmente dovuto a fenomeni di convogliamento del segnale radio.

Per approfondire le differenze sulla sensibilità di ricezione dei tre modelli di smartphone e allo stesso tempo comprendere l'influenza dell'orientamento dell'antenna ricevente sul valore RSSI, si sono eseguiti dei test nei quali le letture di potenza sono state ottenute ruotando, di volta in volta, lo smartphone sul piano. Si precisa che non sono state prese in considerazione rotazioni sui tre assi, in quanto tali approfondimenti esulano dalle finalità di queste prove, prevalentemente orientate ad ottenere una comprensione d'insieme del comportamento dei dispositivi utilizzati. Di seguito i risultati relativi alle prove con il Beacon a 1 m e 2 m da terra (figure 5.10 e 5.11).

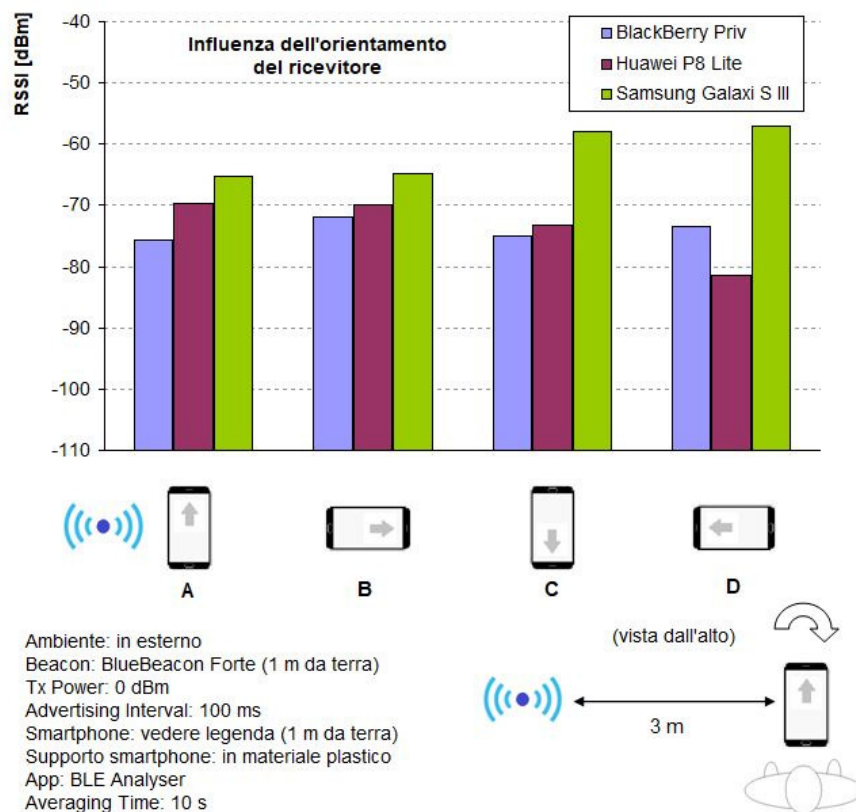


Figura 5.10: misure RSSI in esterno (test n° 5)

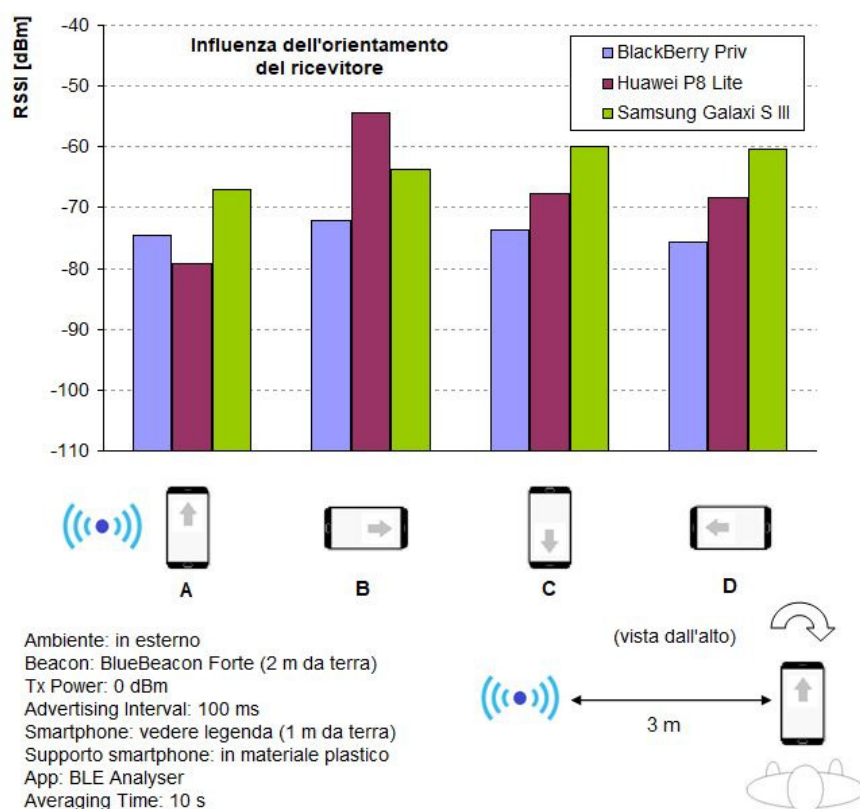


Figura 5.11: misure RSSI in esterno (test n° 6)

I test n° 5 e n° 6 (figure 5.10 e 5.11) confermano le differenze di sensibilità, viste nel test n° 4, tra i diversi modelli di smartphone; anche in questo caso il Samsung S III presenta una più elevata sensibilità di ricezione. Inoltre i risultati evidenziano che la potenza ricevuta è significativamente influenzata dall'orientamento del dispositivo rispetto alla sorgente radio. Il fenomeno è certamente dovuto al comportamento non omnidirezionale delle antenne e alla posizione dell'elemento ricevente all'interno dello smartphone, elemento che a seconda dell'orientamento può trovarsi schermato da altri componenti circuitali.

Il test successivo (figura 5.12) è stato realizzato per ottenere qualche dato sul comportamento dell'antenna trasmittente del BlueBeacon Forte.

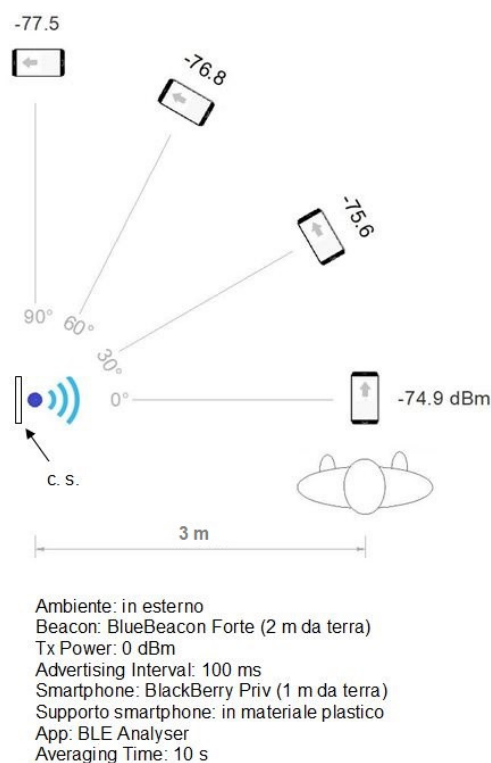


Figura 5.12: misure RSSI in esterno (test n° 7)

Il test n° 7 è stato realizzato posizionando il Beacon a 2 m da terra, avendo cura di orientare il circuito stampato (c.s.) perpendicolarmente alla linea ottica di 0°, come illustrato in figura 5.12. Spostando il ricevitore dalla perpendicolare è stata rilevata una diminuzione di potenza, con abbattimenti dell'ordine di 3 dBm al raggiungimento dei 90° di angolazione. L'antenna trasmittente del BlueBeacon Forte è integrata a livello del circuito stampato, in pratica è stata realizzata con la classica pista di rame opportunamente sagomata. Tale elemento, nonostante la sua semplicità costruttiva, ha fornito un buon comportamento omnidirezionale. Si consiglia solo un miglior posizionamento rispetto alla generosa batteria interna, la quale in alcuni particolari casi installativi può causare un minimo mascheramento del segnale. Una soluzione potrebbe essere quella individuata, da BlueUp stessa, per la realizzazione del modello BlueBeacon Mini, dove la batteria è posizionata dietro il circuito stampato, lasciando frontalmente libera l'antenna.

I Beacon possono essere installati in varie posizioni (sia a parete che a soffitto), pertanto l'antenna è progettata per soddisfare al meglio diverse esigenze di utilizzo, ma si ritiene

opportuno per i dispositivi di galleria realizzare antenne trasmettenti ottimizzate in base alla posizione d'installazione e all'area di copertura radio prevista.

L'immagine seguente (figura 5.13) rappresenta un semplice test con l'utilizzo simultaneo di due Beacon. Il comportamento poteva già essere dedotto dalle prove viste precedentemente, in quanto i segnali emessi da più dispositivi, grazie ai noti accorgimenti di trasmissione²⁴, difficilmente possono influenzarsi tra loro (§ 4.4.1). Tale grafico è stato comunque riportato in quanto restituisce un'immediata comprensione visiva di un esempio di positioning basato sull'indicatore RSSI.

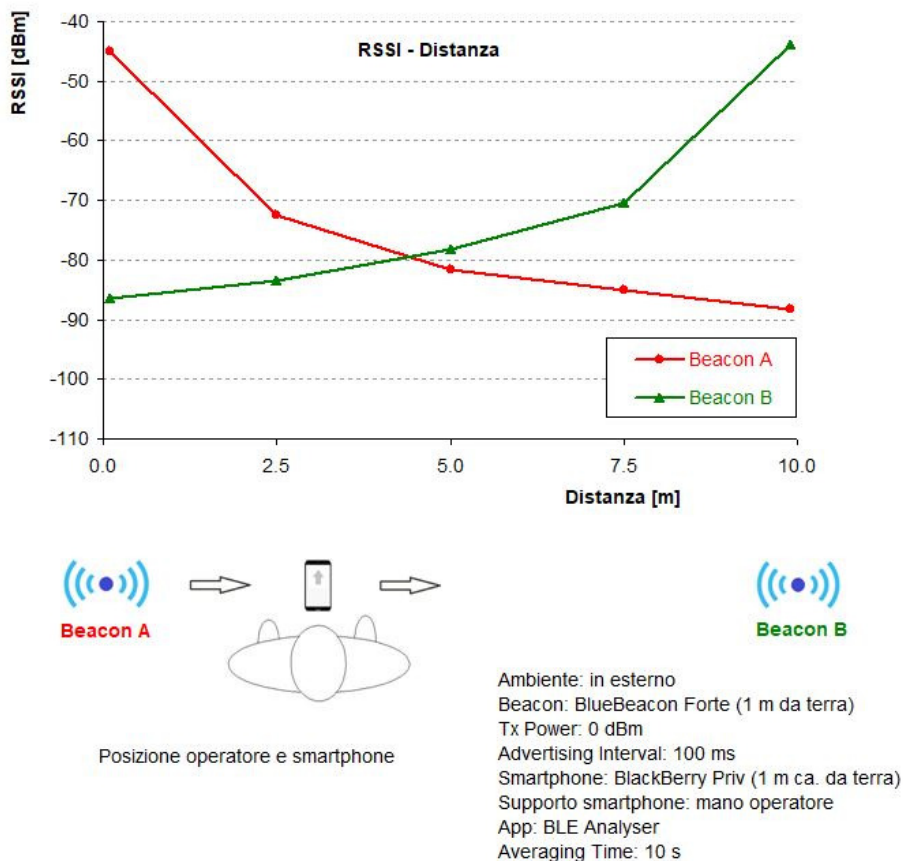


Figura 5.13: misure RSSI in esterno (test n° 8)

²⁴ I pacchetti dati vengono trasmessi dai Beacon con un intervallo di tempo programmabile (advertising interval), ma le specifiche BLE, al fine di ridurre significativamente la probabilità di collisioni multiple persistenti tra le trasmissioni di due o più dispositivi, richiedono che all'intervallo impostato venga aggiunto un tempo di ritardo pseudo casuale tra 0 e 10 ms. Tali aspetti sono stati trattati nel paragrafo 4.4.1.

Nel test n° 8 (figura 5.13) l'operatore è stato posizionato in modo da non schermare il segnale proveniente dai Beacon e le curve relative ai due trasmettitori presentano una soddisfacente simmetria, individuando correttamente un punto di contatto, ad ugual potenza, in prossimità della mezzeria. Purtroppo in situazione reali tali risultati sono difficilmente ottenibili, si pensi che è sufficiente l'interferenza dell'operatore per procurare deleterie condizioni di propagazione *NLOS* (figura 5.8). Generalmente nelle applicazioni indoor, al fine di ridurre le interferenze di persone e oggetti in movimento, è consigliabile installare i Beacon a parete o a soffitto ad altezze dell'ordine di 3-4 m.

La seguente immagine (figura 5.14) è relativa allo screenshot dell'applicativo BLE Analyser, effettuato durante la lettura dei segnali del test n° 8 nella posizione di mezzeria (5m).



Figura 5.14: schermata dell'app BLE Analyser raffigurante i valori rilevati a 5 m nel test n° 8

I risultati di questi primi test, nonostante siano stati realizzati in esterno e senza ostacoli ambientali, evidenziano chiaramente le criticità note (§ 4.2.4) in merito all'utilizzo del

valore RSSI nella stima della distanza tra un trasmettitore e un ricevitore a radio frequenza.

Di seguito si riassumono le principali criticità rilevate:

- il *ranging* su base RSSI risulta praticabile solo entro pochi metri (sino a 3-4) dal dispositivo trasmittente, sempreché non siano presenti interferenze e si riesca ad adattare l'algoritmo di stima alle specifiche condizioni di propagazione del segnale; oltre tale distanza l'andamento della potenza ricevuta diventa di difficile interpretazione, in quanto la modesta riduzione è disturbata da rimbalzi a maggior potenza (figure 5.6.e 5.7);
- sono presenti elevate oscillazioni intorno al valore medio, come si può vedere dai segmenti min-max (figure 5.6.e 5.7);
- il valore RSSI è fortemente influenzato dalla posizione del soggetto, in particolare quando questo si trova tra il trasmettitore e il ricevitore. In pratica si ha un forte abbattimento della potenza ricevuta quando il sistema si trova in condizioni *NLOS* - No Line of Sight - (figura 5.8);
- il valore RSSI è influenzato anche dalla posizione della mano sullo smartphone (figura 5.9);
- il valore RSSI è influenzato dall'orientamento dello smartphone (figure 5.10 e 5.11) e in generale dall'orientamento delle antenne trasmittenti e riceventi;
- il valore RSSI dipende dal modello di smartphone utilizzato (figure 5.9, 5.10 e 5.11).

In merito alle oscillazioni intorno al valore medio, al fine di non incorrere in grossolani errori, risulta necessario evitare di impostare sul ricevitore finestre di scansione particolarmente brevi. Purtroppo l'incremento temporale della finestra di lettura conduce inevitabilmente ad un aumento della latenza nell'aggiornamento del positioning. Risultano quindi necessarie soluzioni di compromesso tra accuratezza e latenza, nonché l'utilizzo di algoritmi evoluti di stima, in grado di sfruttare diversi accorgimenti, quali medie pesate e tagli ai segnali ritenuti fuori scala.

I fenomeni sin qui visti, se pur noti, risultano difficilmente modellabili, pertanto in questi ambiti i riscontri sperimentali rivestono sempre grande utilità; in particolare questi primi test hanno consentito di approfondire, in ambiente non confinato, le conoscenze teoriche sul comportamento radio delle apparecchiature di nostro interesse e soprattutto hanno consentito di familiarizzare con i dispositivi specifici forniti da BlueUp, ovvero con il Beacon BLE modello BlueBeacon Forte. A tal proposito si ritiene doveroso sottolineare brevemente l'elevata qualità dei dispositivi utilizzati. Non sono stati infatti rilevati difetti o malfunzionamenti e ogni dispositivo ha restituito un funzionamento affidabile, sia in merito agli aspetti di programmazione che di trasmissione operativa. Inoltre non sono state rilevate significative differenze tra un dispositivo e l'altro sulle caratteristiche del segnale trasmesso.

Tornando ai risultati di questi primi test, si ritiene, in accordo con quanto emerge in letteratura, che l'indicatore RSSI sia interessato da così numerosi e complessi fenomeni legati alla propagazione delle onde elettromagnetiche da risultare di fatto un indicatore semialeatorio. Ciò nonostante, vista la semplicità di utilizzo e i bassi costi richiesti, l'RSSI rappresenta ancora oggi un riferimento elettivo per la realizzazione di sistemi sostenibili di indoor positioning. Certamente un puro e accurato *ranging* su base RSSI risulta difficilmente realizzabile in presenza di significativi elementi d'interferenza, ma occorre però tener conto dei notevoli sviluppi nell'ambito delle varie tecniche di utilizzo dell'indicatore RSSI (§ 4.3.1, 4.3.5 e 4.3.6) [D14][D19][D24][F7]. Il valore della potenza ricevuta può infatti essere utilizzato in tecniche di localizzazione *Range-Free*, oppure è possibile compensare gli errori di stima della distanza con algoritmi e filtri correttivi o supportare i dati RSSI con altre tecnologie di localizzazione, come ad esempio quella inerziale [D20] e geomagnetica [F4].

In questo complesso quadro tecnologico i Beacon BLE risultano senz'altro di aiuto, in quanto si prestano ad architetture particolari e personalizzabili allo specifico ambiente di installazione. Con questi dispositivi infatti non rappresenta un problema la realizzazione di sistemi ad elevata densità di nodi di riferimento, i quali possono compensare, almeno in parte, le criticità legate ai fenomeni di propagazione del segnale. Allo stato dell'arte risulta comunque evidente che il parametro RSSI difficilmente può consentire di raggiungere prestazioni di localizzazione elevate, confrontabili ad esempio

con quelle del ToA, utilizzato nel sistema GPS (§ 4.2.1). D'altro canto non sempre sono richieste prestazioni elevate in termini di accuratezza e precisione, pertanto le soluzioni tecnologiche di un sistema di localizzazione indoor devono essere valutate in relazione alle effettive esigenze applicative e alla sostenibilità economica. Nel nostro caso di galleria, nonostante la presenza di numerose fonti di interferenza (veicoli, persone, ecc.), le distanze in gioco sono notevoli, pertanto non sono indispensabili elevati livelli di accuratezza e precisione. In tal senso si ritiene che prestazioni di localizzazione dell'ordine di 5-10 m possano già risultare sufficienti per fornire informazioni molto utili all'utente di galleria. Tali risultati, come vedremo, possono anche essere ottenuti sfruttando i Beacon come dispositivi di prossimità [D4], senza necessariamente ambire ad un positioning di elevata accuratezza e privo di soluzioni di continuità.

In base a queste riflessioni, consapevoli delle difficoltà da affrontare, si è ritenuto meritevole proseguire la ricerca, in particolare al riguardo delle prove sperimentali in galleria.

5.2.2 In comuni ambienti chiusi

I test che abbiamo visto nel paragrafo precedente sono stati realizzati all'aperto in condizioni poco impegnative ai fini della propagazione dei segnali radio, in questo caso invece si riportano alcuni dei risultati ottenuti in comuni ambienti chiusi. Sono state realizzate prove sia in un ambiente di piccole dimensioni, che in un ambiente più grande messo a disposizione dalla Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale della Sapienza. Tali test non sono finalizzati ad analisi di radio propagazione, ma solo a comprendere le principali differenze sul comportamento dei segnali, in modo da poter meglio preparare le prove in galleria.

In generale in un ambiente chiuso le interferenze sul segnale a 2.4 GHz sono causate non solo dal pavimento e dall'eventuale presenza di oggetti e persone, ma anche dal soffitto e dalle pareti che delimitano il locale. Di seguito (figure 5.15 e 5.16) si riportano i risultati ottenuti posizionando un Beacon sulla parete di un piccolo locale di 4(L)x3(W)x3(H) m.

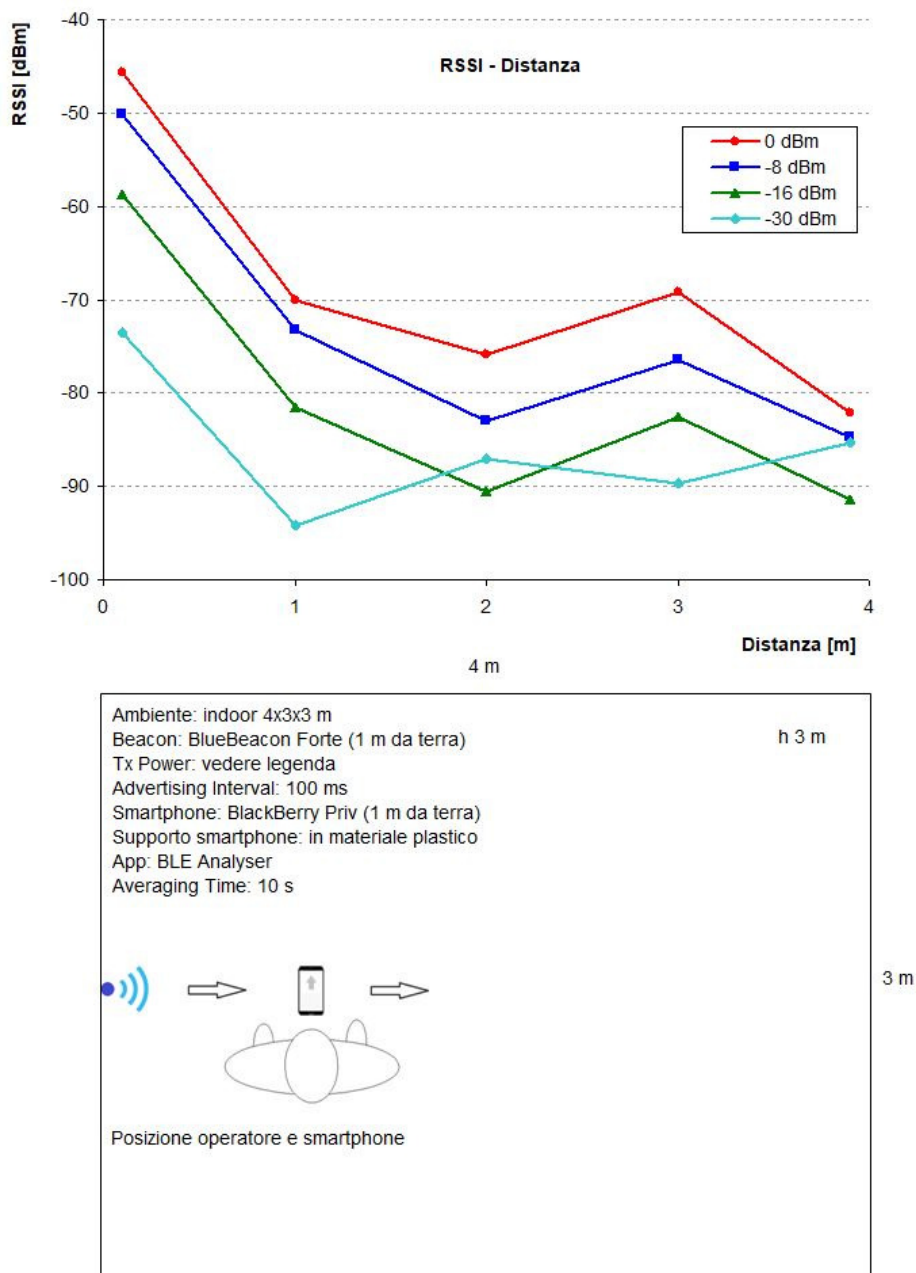


Figura 5.15: misure RSSI indoor, ambiente 4x3x3 m (test n° 9)

Il test successivo (figura 5.16) è sempre relativo al piccolo ambiente, ma in questo caso il Beacon è stato posizionato a 2 m da terra, selezionando una potenza di trasmissione di -8 dBm. Anche in questo test, come descritto nella prova in esterno di figura 5.7, si è provveduto a ruotare il Beacon, in modo da posizionare l'antenna integrata al di sotto della batteria.

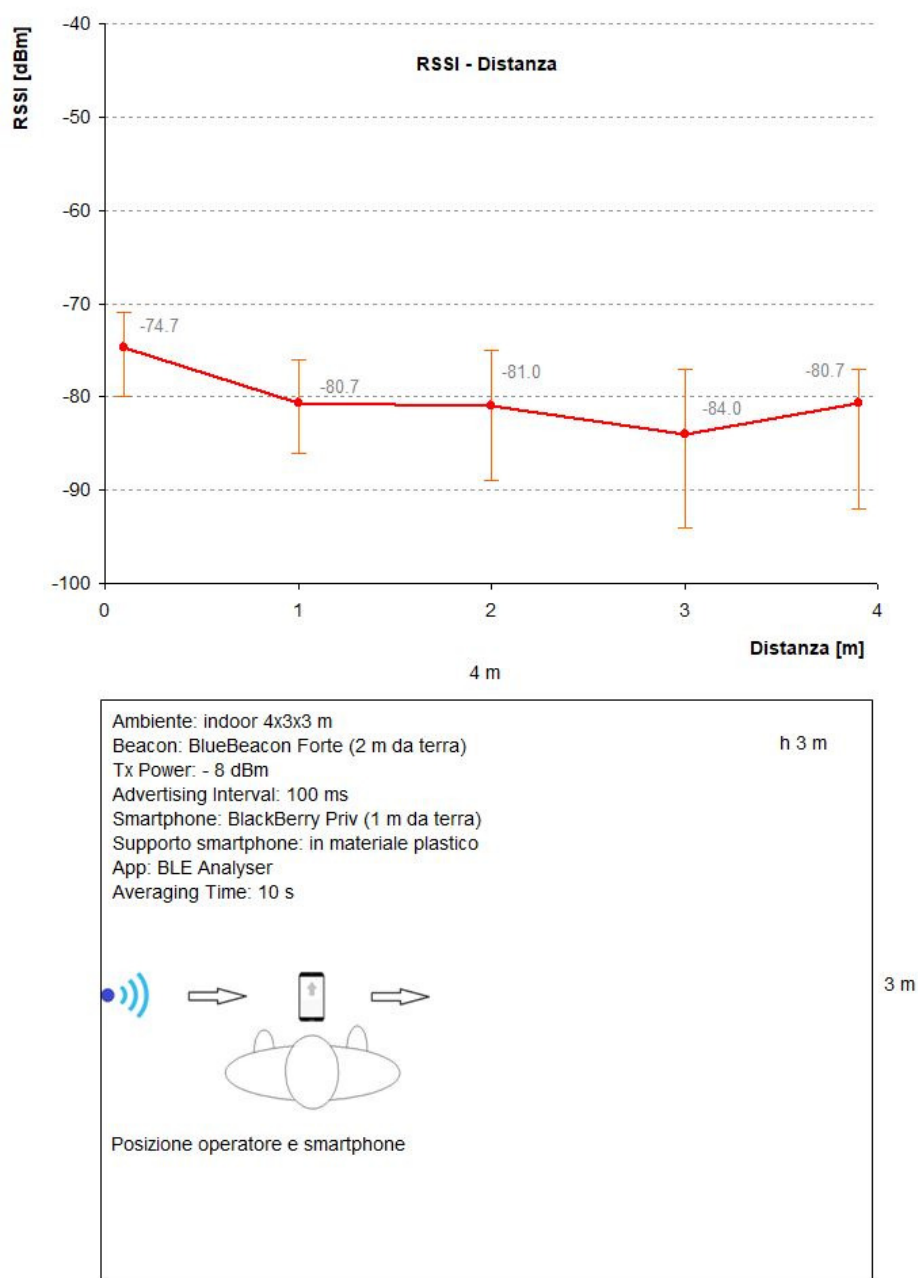


Figura 5.16: misure RSSI indoor, ambiente 4x3x3 m (test n° 10)

In ambienti indoor, soprattutto se di piccole dimensioni, le difficoltà relative all'utilizzo dell'indicatore RSSI aumentano notevolmente. I risultati ottenuti nel test n° 9 (figura 5.15) evidenziano infatti la presenza di forti disturbi da riflessione. L'andamento delle curve RSSI è praticamente simile con potenze di trasmissione di 0, -8 e -16 dBm, dove il fenomeno di maggior riflessione è stato individuato a circa 1 m dalla parete opposta. Impostando una potenza di trasmissione molto bassa (-30 dBm) le cose non migliorano, si presentano infatti fenomeni di instabilità con oscillazioni multiple, comportamento

dovuto probabilmente alle condizioni di riflessione associate ad un segnale troppo debole. Posizionando invece il dispositivo BLE a 2 m da terra, con potenza di trasmissione di -8 dBm (test n° 10, figura 5.16), si ottiene una curva deludente con un rimbalzo di potenza in prossimità della parete opposta. Sono state eseguite anche delle prove posizionando il Beacon a 3 metri da terra, sia in parete che a soffitto, ma i risultati sono stati ugualmente scarsi.

In conclusione in ambienti di piccole dimensioni non risulta praticabile un *ranging* su base RSSI, mentre è possibile tentare un positioning di prossimità. Ad esempio, dopo aver impostato sul ricevitore un opportuno taglio di segnale (filtro passa alto), il soggetto può essere localizzato sulle coordinate del Beacon quando si trova in prossimità del dispositivo stesso. Un positioning di questo tipo risulta affetto da soluzioni di continuità e presenta livelli di accuratezza che dipendono dal numero e dalla posizione dei Beacon nell'ambiente, pertanto le prestazioni devono essere valutate e progettate in base alle specifiche esigenze. In determinate applicazioni, con un numero adeguato di Beacon, le tecniche di positioning basate sulla prossimità, o sul segnale più forte ricevuto, possono risultare soddisfacenti, soprattutto se utilizzate a supporto di tecniche più complesse. A tal proposito si ritiene interessante considerare tali aspetti di funzionamento tra le possibili soluzioni di positioning da utilizzare in galleria.

A questo punto passiamo alle prove effettuate nel locale universitario; si tratta del piano terra dell'edificio A della Facoltà di Ingegneria. In questo ambiente sono stati eseguiti sia alcuni test RSSI sia brevi test preliminari di vera e propria navigazione indoor. In figura 5.17 si riporta l'immagine del locale, le cui dimensioni sono circa 22(L)x4(W)x5(H) m. Le frecce rosse indicano due Beacon posizionati in parete durante alcuni test iniziali relativi al parametro RSSI, mentre sul pavimento si può notare il nastro metrico per la misura delle distanze in gioco.



Figura 5.17: locale della Sapienza utilizzato per alcuni test preliminari con i Beacon

In questo locale i test RSSI, sulla falsa riga di quelli già visti, sono stati eseguiti posizionando i Beacon a diverse altezze da terra (da 1 a 3 metri) e provando diverse potenze di trasmissione.

Si riportano i grafici (figure 5.18 e 5.19) relativi ai risultati ottenuti posizionando i dispositivi ad un'altezza da terra di 2.5 m, con una potenza di trasmissione di 0 dBm. Tali impostazioni, condivise con BlueUp, sono state quelle selezionate per realizzare nel locale anche le prove di indoor positioning. La soluzione con dispositivi in parete, anziché a soffitto, è stata scelta in quanto ritenuta più utile a preparare le successive prove di galleria.

I dispositivi BlueBeacon Forte, a 2.5 m da terra, sono stati installati con l'antenna integrata posizionata al di sotto della batteria, in questo modo è stata migliorata la ricezione nella zona immediatamente sottostante al Beacon.

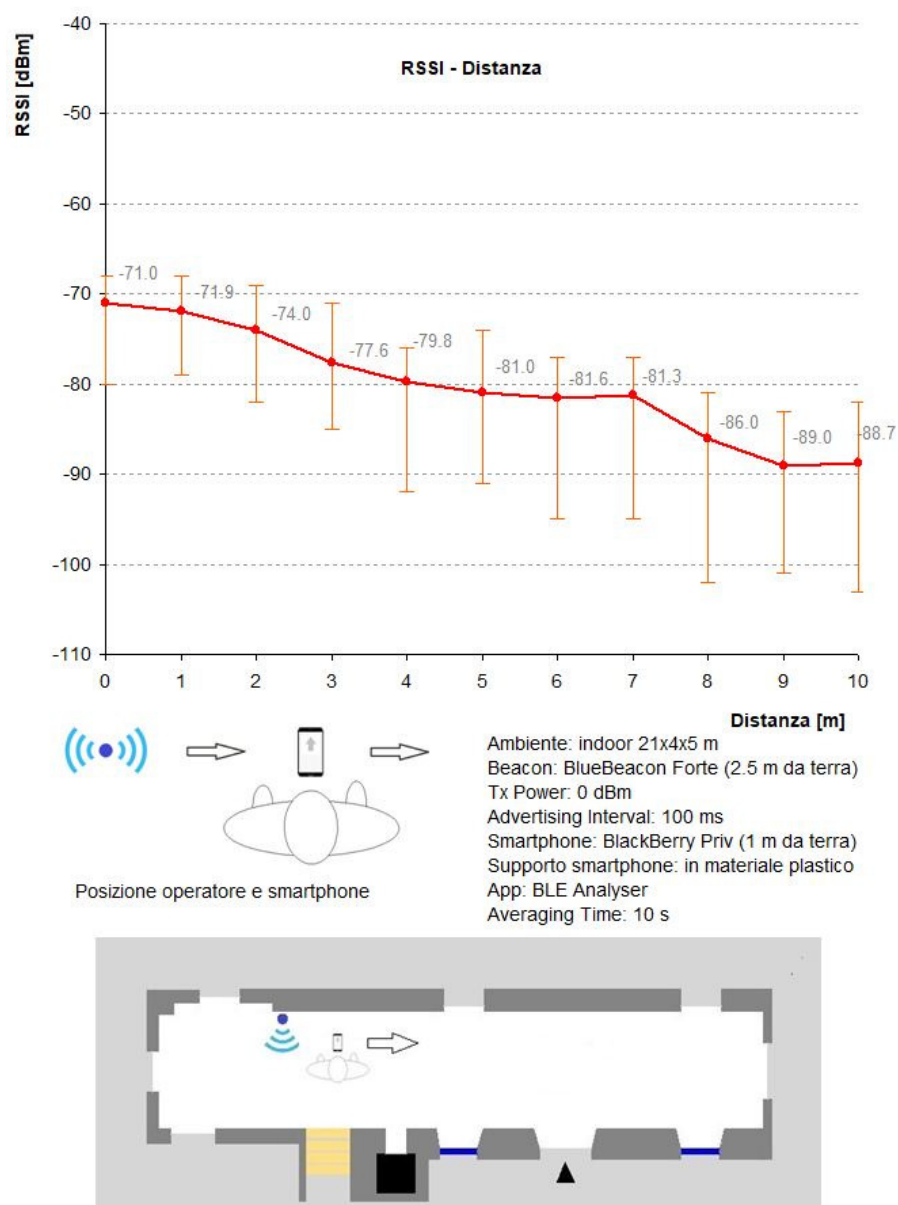


Figura 5.18: misure RSSI indoor, ambiente 22x4x5 m (test n° 11)

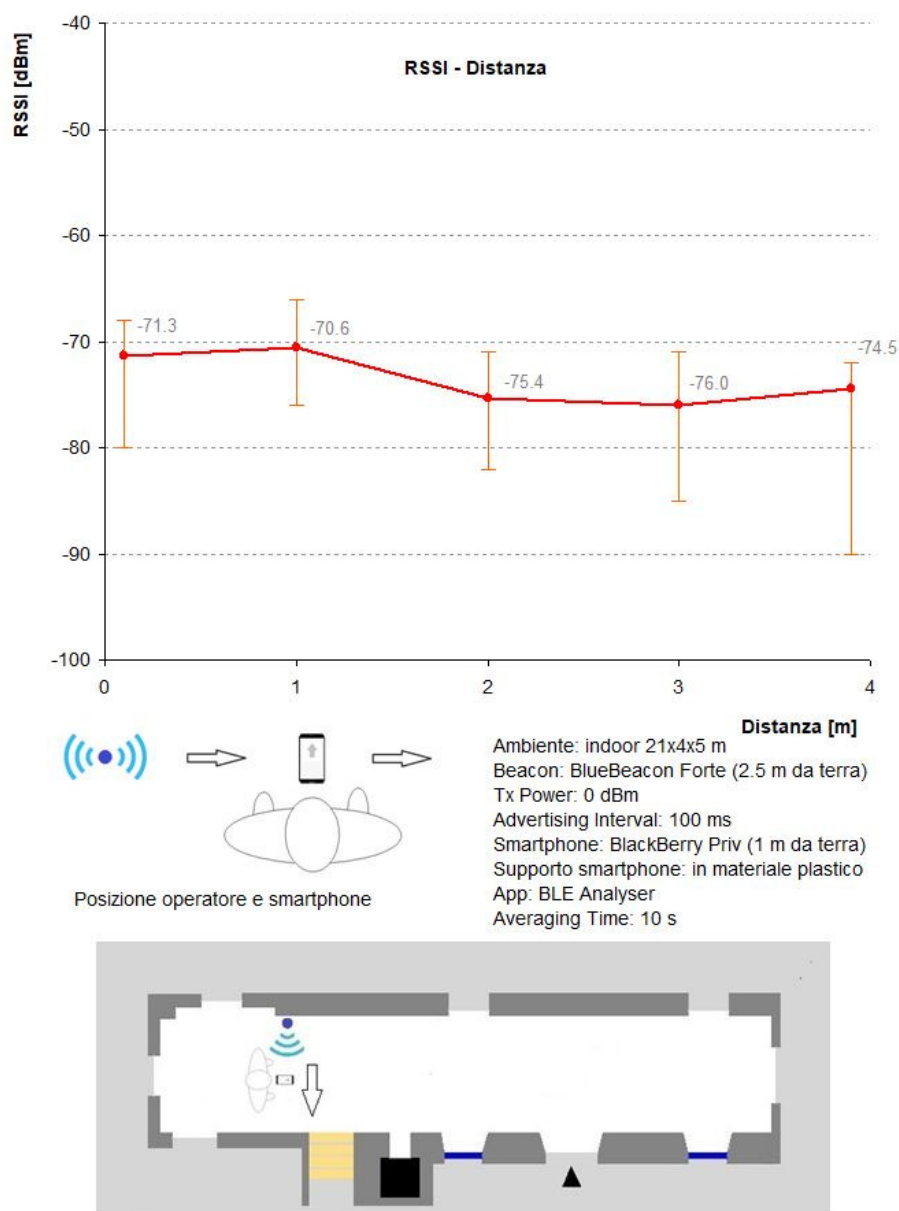


Figura 5.19: misure RSSI indoor, ambiente 22x4x5 m (test n° 12)

Il test n° 11, come indicato in figura 5.18, è stato eseguito spostandosi lungo il lato lungo dell'ambiente, a circa 1 metro dalla parete. Le letture hanno restituito un soddisfacente andamento del valore RSSI, in quanto non si registrano i forti disturbi da riflessioni incontrati precedentemente nel piccolo locale 4x3x3 m.

Nel test n° 12 le letture RSSI sono state invece eseguite spostandosi lungo il lato corto, come indicato in figura 5.19. In questo caso si rilevano le prevedibili riflessioni dovute alla vicinanza della parete opposta. L'incremento di potenza, rilevato tra 0 e 1 m di distanza, sembrerebbe invece dovuto alla presenza della parete di posizionamento e alla

diversa risposta delle antenne (trasmittente e ricevente) in relazione al loro orientamento. A tal proposito si ritiene che i Beacon di galleria dovranno disporre di un'antenna ottimizzata in base alla posizione d'installazione e alla zona di copertura radio prevista.

Occorre inoltre precisare che i risultati appena visti sono stati ottenuti con l'operatore posizionato in modo da non coprire il segnale proveniente dal Beacon, ma tali condizioni favorevoli, come si è visto nel test di figura 5.8, sono difficili da garantire anche aumentando l'altezza da terra dei trasmettitori BLE. Infatti la normale posizione di utilizzo dello smartphone, molto vicina al corpo del soggetto, porta facilmente a condizioni *NLOS* (No Line of Sight). A tal proposito sono stati comunque eseguiti dei test di confronto (modificando la posizione dell'operatore rispetto al Beacon), i quali hanno restituito risultati simili e coerenti con quelli riportati nel test n° 3 di figura 5.8.

A questo punto non ci resta che passare ai test di localizzazione per osservare come si comportano i Beacon e l'applicativo di navigazione. Per la realizzazione di tali prove sono stati utilizzati n° 10 dispositivi BlueBeacon Mini e l'applicativo BlueBeacon Navigator Demo (§ 5.1.1), caricato su uno smartphone BlackBerry modello Priv.

I dispositivi BLE, fissati in parete a 2.5 m da terra, sono stati posizionati e identificati come riportato in figura 5.20.

Si precisa che la planimetria è stata realizzata utilizzando i colori e il livello di dettaglio richiesti dal software di navigazione dimostrativo. I dati identificativi dei Beacon, la loro posizione e la planimetria del locale sono stati forniti all'applicativo di navigazione seguendo la procedura descritta precedentemente nel paragrafo 5.1.1.

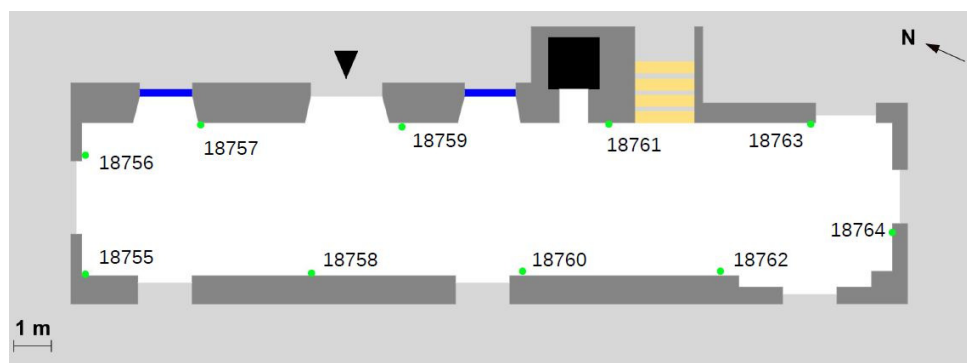


Figura 5.20: planimetria del locale Sapienza e posizionamento Beacon per test di navigazione indoor

La figura 5.21 riporta un'immagine della fase d'installazione dei Beacon. Al fine di identificare visivamente i dispositivi, si è utilizzata una etichetta adesiva per riportare il numero di serie direttamente sul contenitore.

Il fissaggio a parete è stato invece eseguito con un semplice chiodino, utilizzando una piccola basetta di supporto in PVC, alla quale è stato fissato il Beacon con del nastro adesivo attacca e stacca.



Figura 5.21: installazione dei Beacon a 2.5 m da terra nel locale Sapienza

I dispositivi BlueBeacon Mini sono stati provati con diverse impostazioni in merito alla potenza, all'intervallo di trasmissione e al parametro RSSI a 1 metro. Di seguito si riporta la programmazione completa con i dati identificativi e con le impostazioni di trasmissione che hanno restituito i risultati migliori:

- Formato BLE: iBeacon
- UUID: 3C8836E08FE611E89EB6529269FB1459
- Major: 1
- Minor: da 18755 a 18764
- Advertising Interval: 100 ms
- Radio Tx Power: 0 dBm

- RSSI a 1 m di distanza: -54 dBm²⁵

Passiamo ora alle impostazioni relative all'applicativo di navigazione BlueBeacon Navigator Demo [F3][F7]; come descritto nel paragrafo 5.1.1, si tratta di un ottimo software dimostrativo che consente di agire sull'algoritmo proprietario di multilaterazione attraverso la modifica di diversi parametri, inclusa la possibilità di selezionare filtri avanzati di segnale ed eventuali altre elaborazioni di supporto alla localizzazione (es. dati inerziali). Nonostante le numerose funzioni offerte dall'applicativo, dopo numerosi test di taratura, si sono ottenuti complessivamente risultati soddisfacenti con impostazioni piuttosto semplici; di seguito si riportano i parametri impostati:

- Scan Time: 0.5 s (valore minimo impostabile)
- RSSI Threshold (cut value for RSSI): -85 dBm
- Alpha Noise (percentage of noise to remove): 10%
- Filtering Method: simple linear
- Particle Filtering: enable

Non sono stati invece utilizzati altri filtri e tecniche avanzate di supporto, quali ad esempio i filtri Kalman e i Motion Model HW-SW, questi ultimi utilizzabili per gestire modelli di movimento predeterminati, informazioni inerziali e di orientamento magnetico.

²⁵ Ad un metro dal Beacon, utilizzando uno smartphone BlackBerry Priv, è stato stimato un valore RSSI medio di circa -62 dBm, tale valore è molto variabile e dipende da numerosi fattori, tra cui anche il modello di smartphone utilizzato (§ 5.2.1). Con il BlueBeacon Navigator Demo, utilizzato sul ricevitore come applicativo di navigazione, questo dato non è risultato però particolarmente critico, grazie agli algoritmi del software, basati prevalentemente su una multilaterazione pesata dei segnali ricevuti. In pratica l'algoritmo ha dimostrato di operare un confronto delle potenze ricevute come tecnica predominante per l'assegnazione della posizione. Ad esempio, se il ricevitore è interessato da due segnali Beacon di potenza pressoché uguale, l'applicativo tende prevalentemente a restituire un positioning equidistante da due trasmettitori BLE, quindi con una certa indipendenza dal tipico RSSI ranging (§ 4.2.4). Sono stati comunque eseguiti diversi test con impostazioni (RSSI a 1 m) tra -50 e -65 dBm, i quali hanno restituito prestazioni ritenute complessivamente migliori (minori oscillazioni posizionali con un giusto compromesso tra accuratezza e precisione) selezionando riferimenti di potenza più elevati. L'approfondimento di tale comportamento non è oggetto di questo elaborato, in quanto necessita uno studio dettagliato degli algoritmi proprietari dell'applicativo (§ 5.1.1). In ogni caso, coerentemente con i risultati ottenuti, è stato individuato come ottimale per la sperimentazione il valore di -54 dBm.

La figura 5.22 rappresenta uno dei risultati di positioning ottenuti durante le prove di navigazione indoor (test n° 13); in pratica l'immagine "a" raffigura la posizione assunta dallo scrivente durante il test, mentre l'immagine "b" rappresenta lo screenshot dello smartphone, effettuato nella posizione assunta in "a". Il doppio cerchio azzurro, presente sulla planimetria di navigazione, rappresenta la posizione individuata dal sistema di localizzazione.

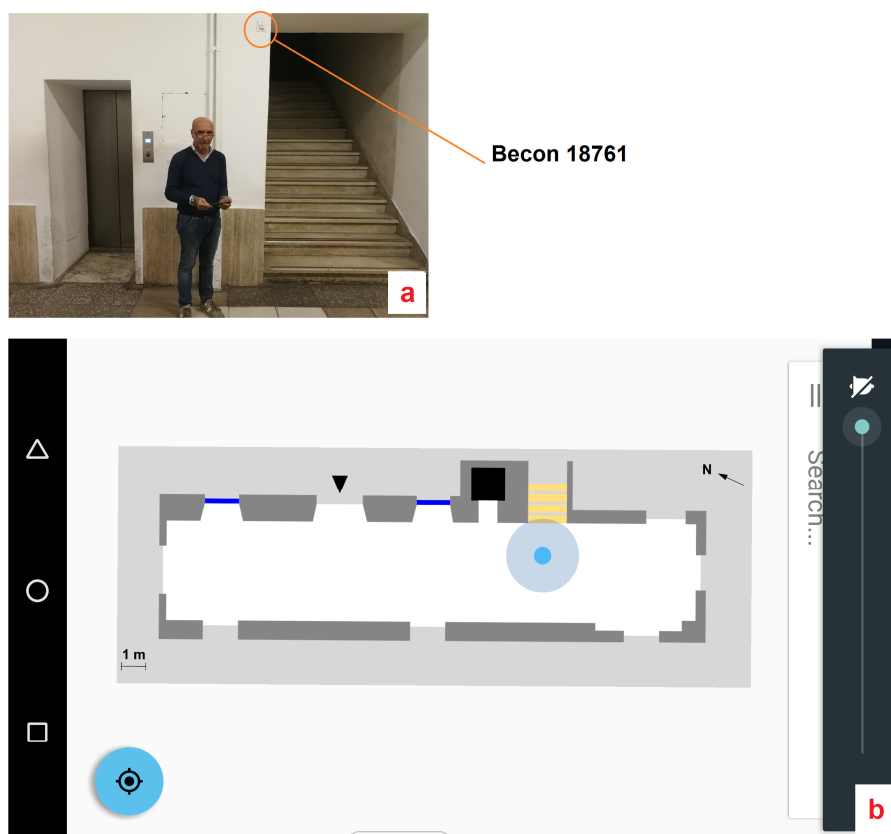


Figura 5.22: raffigurazione di uno dei risultati ottenuti nelle prove di localizzazione svolte in Sapienza (test n° 13) con l'utilizzo di BlueBeacon Mini e applicativo BlueBeacon Navigator Demo [F3][F7]; a) posizione assunta dal soggetto, b) posizione individuata dal sistema di localizzazione

Come viene evidenziato dalle immagini (figura 5.22) la posizione reale assunta dal soggetto (tra l'ascensore e la scalinata) è stata individuata dal sistema con una soddisfacente accuratezza, infatti l'errore è stimabile in circa 1.5 metri. In generale si sono ottenuti risultati simili in buona parte dell'ambiente, con esclusione delle zone vicine agli angoli, in prossimità quindi dei Beacon 18755, 18756, 18763 e 18764, dove gli errori di localizzazione hanno raggiunto anche 3-4 m, probabilmente a causa di un aumento dei fenomeni di riflessione del segnale. In generale, come prevedibile,

l'accuratezza è risultata migliore in prossimità dei Beacon, ma solo se il relativo segnale non veniva mascherato dal corpo dell'operatore o da altri soggetti in movimento nell'ambiente. In condizioni favorevoli lo scarto tra posizione reale e posizione individuata, in alcuni casi, si è avvicinato praticamente a zero, mentre in presenza di condizioni *NLOS* (No Line of Sight) si sono registrati scarti sino a 3-4 m, nonostante la vicinanza del Beacon.

Si segnala che le posizioni individuate dal sistema, come prevedibile, presentavano una certa instabilità nel tempo; in pratica la localizzazione del soggetto, se pur fermo nell'ambiente, variava ad ogni aggiornamento, con deviazioni posizionali sino a 2-3 metri. Anche in questo caso le oscillazioni sono state molto più contenute in prossimità dei Beacon. Occorre inoltre evidenziare che i risultati di posizionamento sono stati migliori lungo l'asse longitudinale dell'ambiente, in quanto trasversalmente è stata registrata una diffusa insensibilità posizionale; anche in questo caso le differenze possono essere imputate a fenomeni di riflessione, peraltro rilevati con le precedenti misure RSSI.

I risultati sopra descritti sono però relativi a localizzazioni statiche, mentre durante gli spostamenti del soggetto (test dinamici di navigazione) si sono registrati ritardi sull'aggiornamento della posizione fornita dal sistema. In pratica il positioning è risultato soddisfacente quando il soggetto si spostava nel locale camminando lentamente (1-1.3 m/s), mentre aumentando il passo si sono registrate evidenti perdite di sincronismo, che in base alla velocità di spostamento hanno portato ad errori istantanei sino a 5-6 m. I tempi di scansione e di elaborazione dei dati hanno restituito una latenza non sempre accettabile, in particolare prevedendo un utilizzo del sistema in condizioni di emergenza, dove generalmente le persone sono chiamate a camminare velocemente o addirittura a correre. Risulta evidente che nella realizzazione dell'IPS di galleria tali aspetti dovranno essere necessariamente approfonditi e migliorati. In prima battuta si ritiene possibile agire a livello di sviluppo dell'applicativo di navigazione; si può ipotizzare ad esempio una semplificazione degli algoritmi di positioning, accettando una riduzione dell'accuratezza e soluzioni di continuità, in modo da ottenere un comportamento dinamico più idoneo alla specifica applicazione.

5.3 Sperimentazione nella galleria stradale di Framura (SP)

Ed eccoci finalmente all'ambiente di nostro interesse: la galleria stradale, dove cercheremo di mettere a frutto le conoscenze sin qui acquisite. Si tratta certamente di un ambiente particolare, anche sotto il profilo geometrico, pertanto sin dalle prime fasi della ricerca si è ritenuto indispensabile poter realizzare dei test sperimentali direttamente in galleria.

La ricerca di un'infrastruttura stradale disponibile è stata particolarmente difficile, in quanto diverse fasi della sperimentazione richiedevano l'interruzione del traffico veicolare. Dopo numerosi tentativi si è ottenuta l'autorizzazione per l'utilizzo di una galleria stradale sita nel comune di Framura, splendido paesino sul mare in Provincia di La Spezia. Per tale disponibilità si ringrazia il Comune e in particolare il Sindaco di Framura, il Sig. Andrea Da Passano. Si tratta di un galleria stradale di modeste dimensioni, ma sufficienti per testare sul campo il funzionamento di base del sistema di nostro interesse. La galleria presenta una lunghezza di circa 135 m, una larghezza di circa 8 m e un raggio di curvatura di circa 120 m; Le figure seguenti (5.23 e 5.24) riportano la posizione geografica dell'infrastruttura stradale (Google Maps) e due immagini fotografiche riprese a livello dell'imbocco sud.



Figura 5.23: posizione geografica (Google Maps) della galleria stradale di Framura (SP)



Figura 5.24: fotografie dell'imbocco sud della galleria stradale di Framura (SP)

La figura 5.25 rappresenta invece una sezione trasversale semplificata dell'infrastruttura stradale.

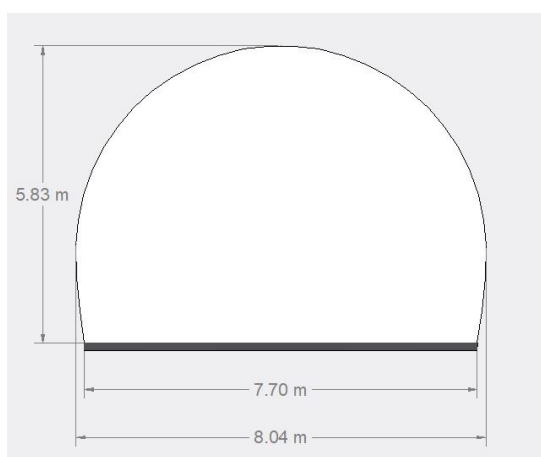


Figura 5.25: sezione trasversale semplificata della galleria stradale di Framura (SP)

La galleria di Framura viene utilizzata sia per accedere alla piccola stazione ferroviaria, sia come parcheggio veicolare. Il traffico è generalmente modesto e i veicoli in parcheggio, sui due lati della strada, si riducono molto verso sera, pertanto è stato possibile effettuare in sicurezza diversi test preliminari. Le prove di localizzazione hanno invece richiesto la chiusura dell'infrastruttura al traffico veicolare e la sospensione dell'utilizzo del parcheggio per l'intera mattina del 13 ottobre 2018. Il test è stato ufficializzato dalla presenza delle autorità locali e da una rappresentanza di docenti del Dottorato di Ricerca in Infrastrutture e Trasporti della Sapienza di Roma.

5.3.1 Preparazione

La preparazione della sperimentazione di indoor positioning in galleria ha richiesto un considerevole impegno, sia in termini di tempo sia sotto il profilo tecnico e organizzativo. Sono state infatti necessarie diverse trasferte a Framura, sia per studiare il sito e preparare la planimetria di navigazione, sia per eseguire i test preliminari sulla propagazione del segnale radio emesso dai Beacon. Inoltre si è reso necessario preparare i dispositivi BLE in laboratorio.

La preparazione dei Beacon, eseguita in laboratorio, ha riguardato principalmente la realizzazione delle basette luminose di supporto, la programmazione e la verifica strumentale a banco dei principali parametri di funzionamento dei BlueBeacon Forte, nonché la preparazione e il controllo di funzionamento degli applicativi su due modelli di smartphone: il BlackBerry Priv, il Samsung Galaxy Xcover 4, quali dispositivi previsti per il test conclusivo di localizzazione.

Di seguito si riportano una serie di figure che illustrano alcune fasi della preparazione dei Beacon in laboratorio.



**Figura 5.26: fase di preparazione dei Beacon in laboratorio;
realizzazione e assemblaggio dei 18 supporti luminosi**

La figura 5.26 illustra una fase della preparazione dei 18 supporti dotati di un dispositivo illuminante a led, tali supporti sono stati utilizzati in galleria per il fissaggio dei Beacon e per consentire l'individuazione visiva dei dispositivi stessi durante i test.

Sia nelle fasi di studio che nei controlli finali (prima della sperimentazione ufficiale) i Beacon sono stati sottoposti ad una serie di misure strumentali a banco, relative al

funzionamento dello stadio RF, ai parametri di trasmissione e alle grandezze di alimentazione, quest'ultime di interesse per gli aspetti legati all'alimentazione di backup a supercapacitori, che vedremo nei paragrafi conclusivi del presente elaborato.

Si è ritenuto opportuno eseguire le misure strumentali, sia per conoscere in modo più approfondito il funzionamento dei dispositivi, sia per effettuare i doverosi controlli prima della prova ufficiale di indoor positioning, onde scongiurare banali inconvenienti tecnici.

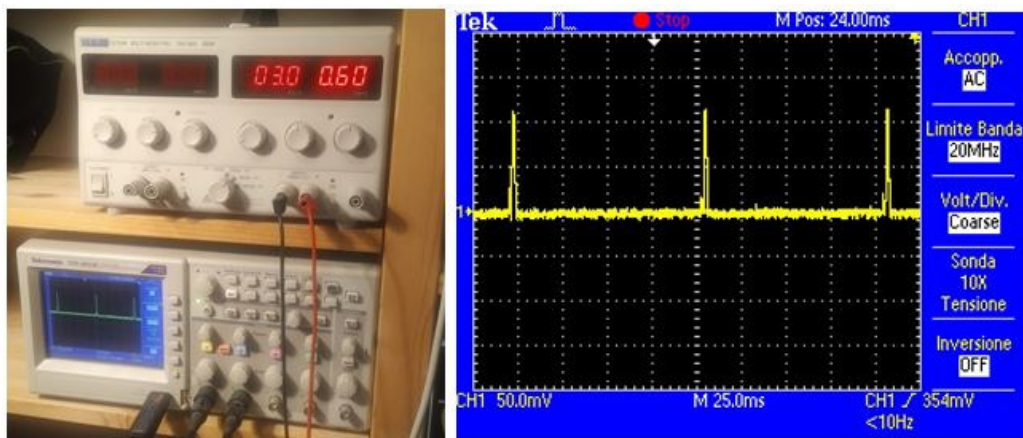


Figura 5.27: una delle fasi del controllo strumentale sul funzionamento e sulle impostazioni del Beacon; Advertising Interval 100 ms

La figura 5.27 riporta, ad esempio, un particolare relativo al controllo dell'intervallo di trasmissione (advertising interval), che nel caso illustrato è di 100 ms, come si può vedere dallo screenshot dell'oscilloscopio digitale (Tektronix TDS 2014C).



Figura 5.28: dispositivi BlueBeacon Forte pronti per i test di galleria

La figura 5.28 illustra i BlueBeacon Forte pronti per i test di galleria. Come si può vedere sono stati preparati n° 18 dispositivi; 9 con led blu e 9 con led rosso. Durante la sperimentazione di indoor positioning i Beacon blu sono stati posizionati in galleria a 3 metri da terra, mentre quelli rossi a 1.5 m. Ogni Beacon riporta chiaramente il suo identificativo sul contenitore, in modo da consentire un'immediata identificazione visiva, oltre che naturalmente attraverso l'apposito software via bluetooth.

I rilievi in galleria, oltre che per eseguire i test RSSI, sono stati necessari per preparare la planimetria di navigazione. Tale planimetria è stata realizzata secondo le esigenze di funzionamento dell'applicativo *BlueBeacon Navigator Demo* (§ 5.1.1), in pratica con colori netti e opportune semplificazioni grafiche. Nel paragrafo relativo al test di navigazione saranno ripresi gli aspetti di planimetria con il relativo posizionamento dei Beacon, di seguito invece si riporta (figura 5.29) una prima immagine della grafica di navigazione, priva però dei necessari riferimenti posizionali che saranno inseriti in seguito.

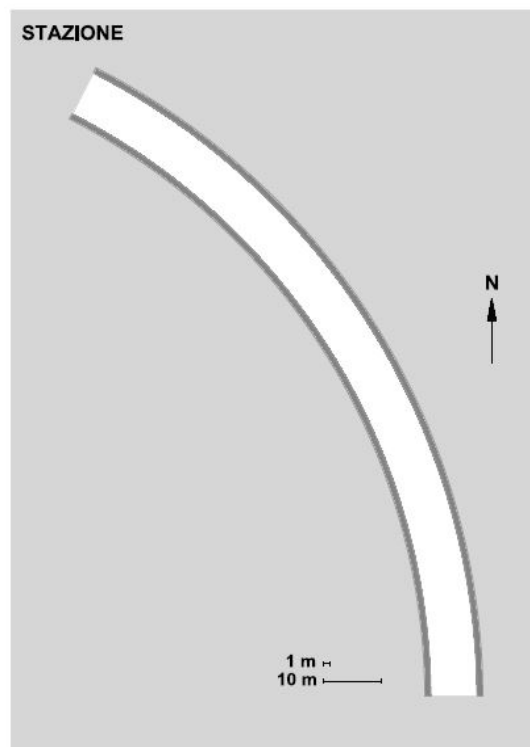


Figura 5.29: planimetria della galleria di Framura (SP) per test di navigazione indoor

A questo punto, prima di passare alla prova di indoor positioning, si riportano alcuni dei risultati sui valori RSSI ottenuti in galleria durante i test preliminari.

5.3.2 Test preliminari

Dopo i test di propagazione del segnale radio, realizzati in esterno e in comuni ambienti indoor, si è giunti finalmente ad indagare il radio comportamento dei dispositivi BLE all'interno di una galleria stradale. Lo scopo principale di questi test preliminari è naturalmente quello di valutare il comportamento dei Beacon in questo specifico ambiente e quindi individuare una posizione d'installazione in grado di restituire risultati soddisfacenti nelle successive prove di navigazione indoor.

A tal proposito sono state eseguite numerose prove per rilevare il valore di potenza del segnale (RSSI) in diversi punti della galleria, tali misure sono state effettuate installando i Beacon in diverse posizioni, a diverse altezze, con diversi orientamenti e impostando diversi valori di potenza trasmessa. Inoltre sono state eseguite alcune misure di confronto in presenza di persone e veicoli, in modo da raggiungere condizioni di propagazione *NLOS* (No Line of Sight).

La figura 5.30 riporta due immagini fotografiche riprese durante le numerose misure eseguite sul segnale radio emesso dai dispositivi BLE. In figura le frecce gialle indicano alcuni Beacon posizionati a 3 metri di altezza, mentre la freccia verde evidenzia il nastro metrico posato sul terreno, in questo caso in direzione longitudinale, per la misura delle distanze in gioco tra i dispositivi BLE trasmettenti e lo smartphone ricevente.



Figura 5.30: riscontro fotografico di alcune misure sul segnale radio emesso dai dispositivi BLE posizionati nella galleria di Framura (SP)

Nelle prossime pagine si riportano alcuni dei risultati ottenuti impostando la potenza di trasmissione a 0 dBm e posizionando i Beacon sulle pareti di galleria ad un'altezza da terra di 1.5 e 3 metri. Tali impostazioni sono quelle individuate per la realizzazione della prova conclusiva di navigazione indoor, illustrata nel paragrafo successivo. Si precisa che l'altezza da terra di 1.5 metri è stata selezionata prevalentemente a scopo di confronto, in particolare per osservare il comportamento del sistema in condizioni critiche durante i successivi test di localizzazione; infatti ad un'altezza così ridotta si avranno facilmente condizioni di propagazione radio *NLOS* (No Line of Sight), in pratica quando la linea ottica tra il Beacon e lo smartphone viene interrotta dalla presenza di ostacoli, come persone e veicoli in movimento.

Si precisa che il disegno del tratto di galleria, riportato alla base dei grafici, è stato approssimato come privo di curvatura.

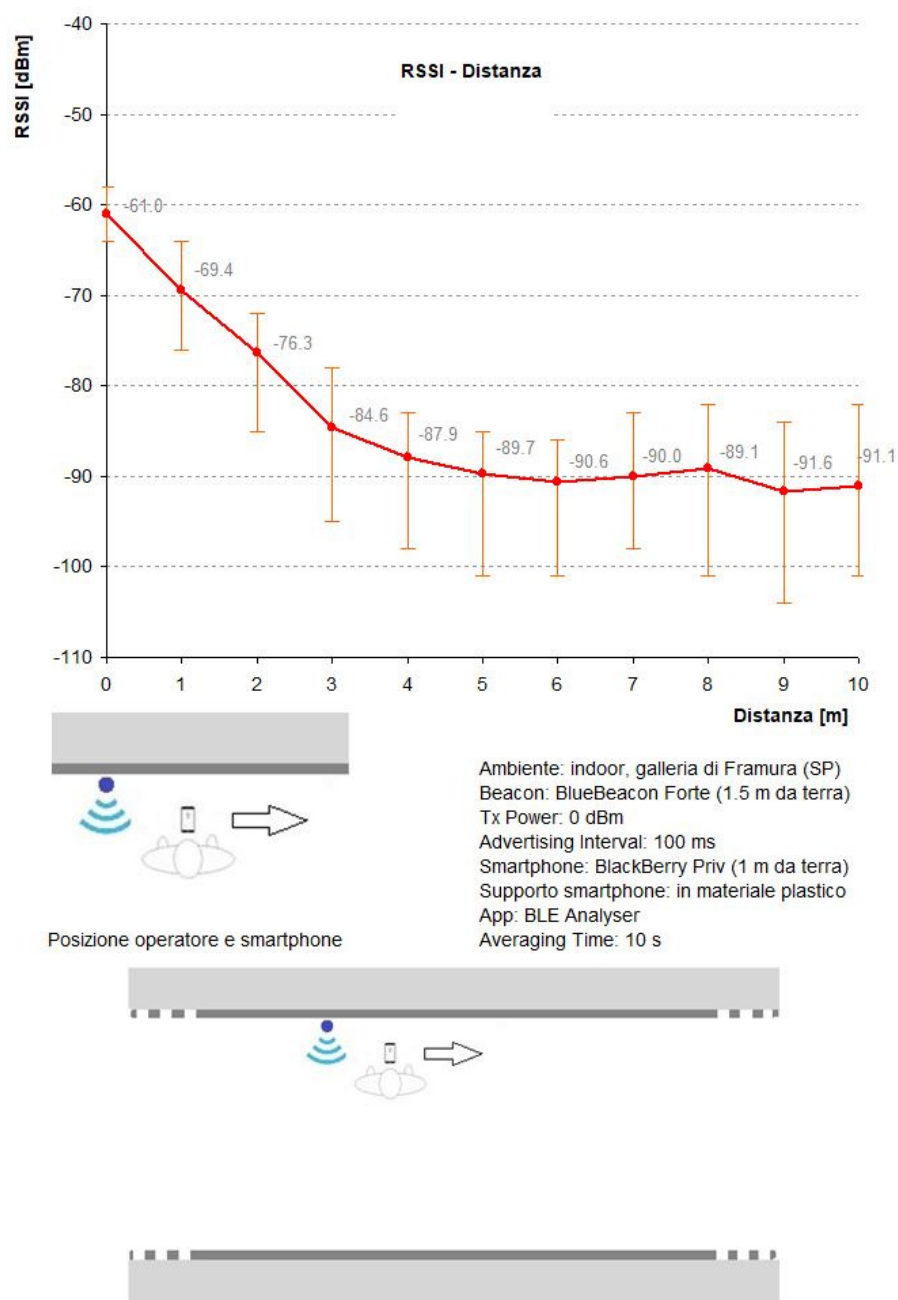


Figura 5.31: misure RSSI indoor, galleria stradale di Framura (test n° 14)

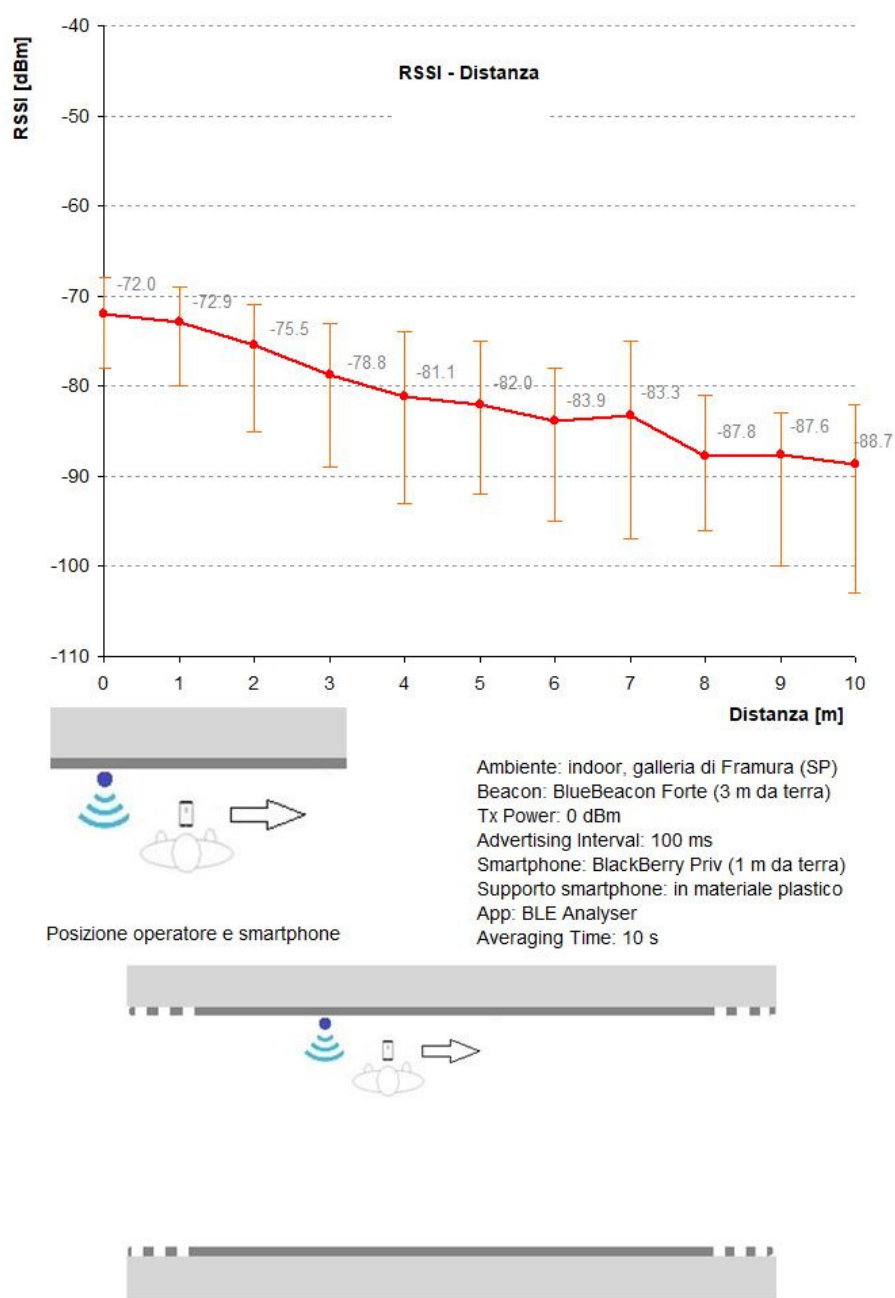


Figura 5.32: misure RSSI indoor, galleria stradale di Framura (test n° 15)

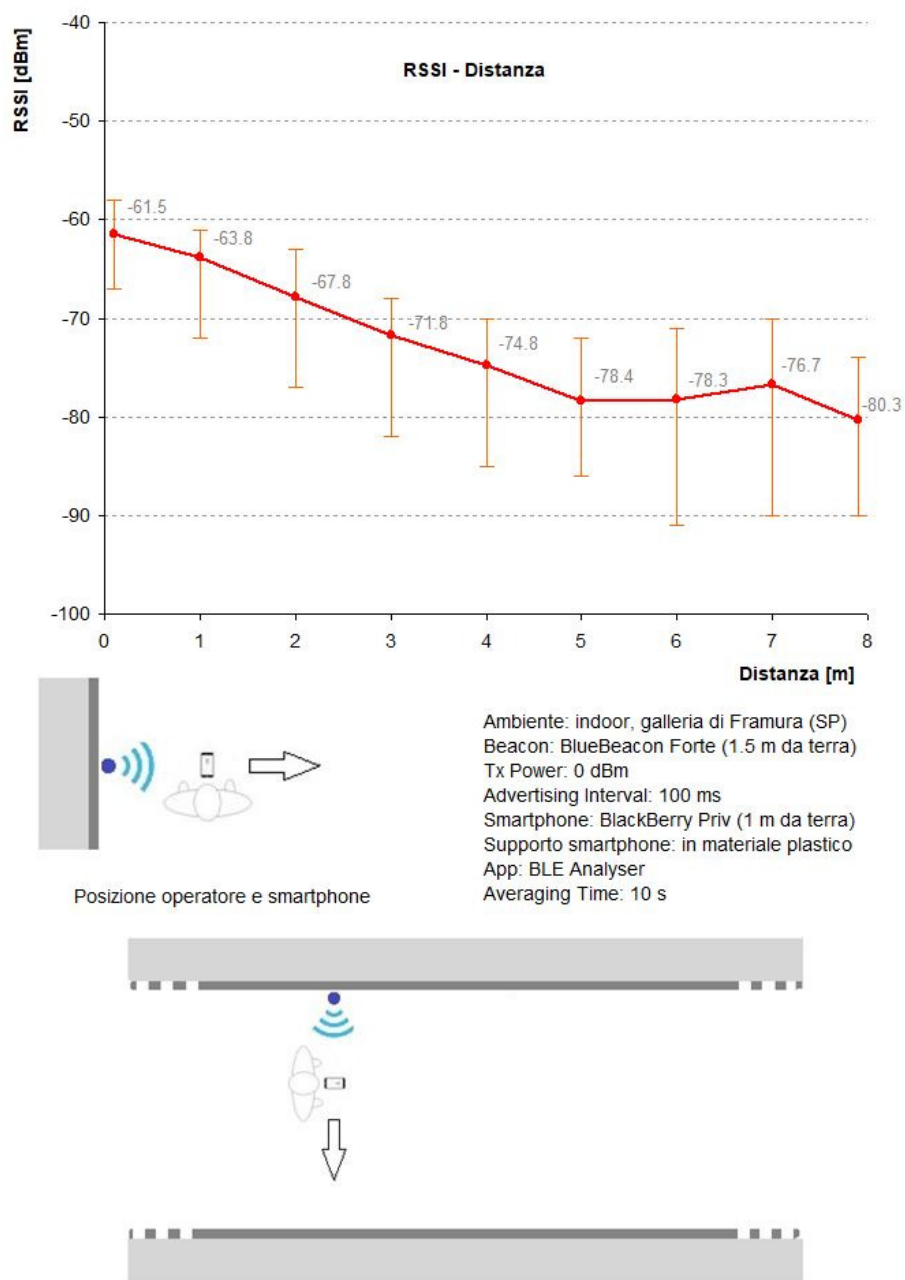


Figura 5.33: misure RSSI indoor, galleria stradale di Framura (test n° 16)

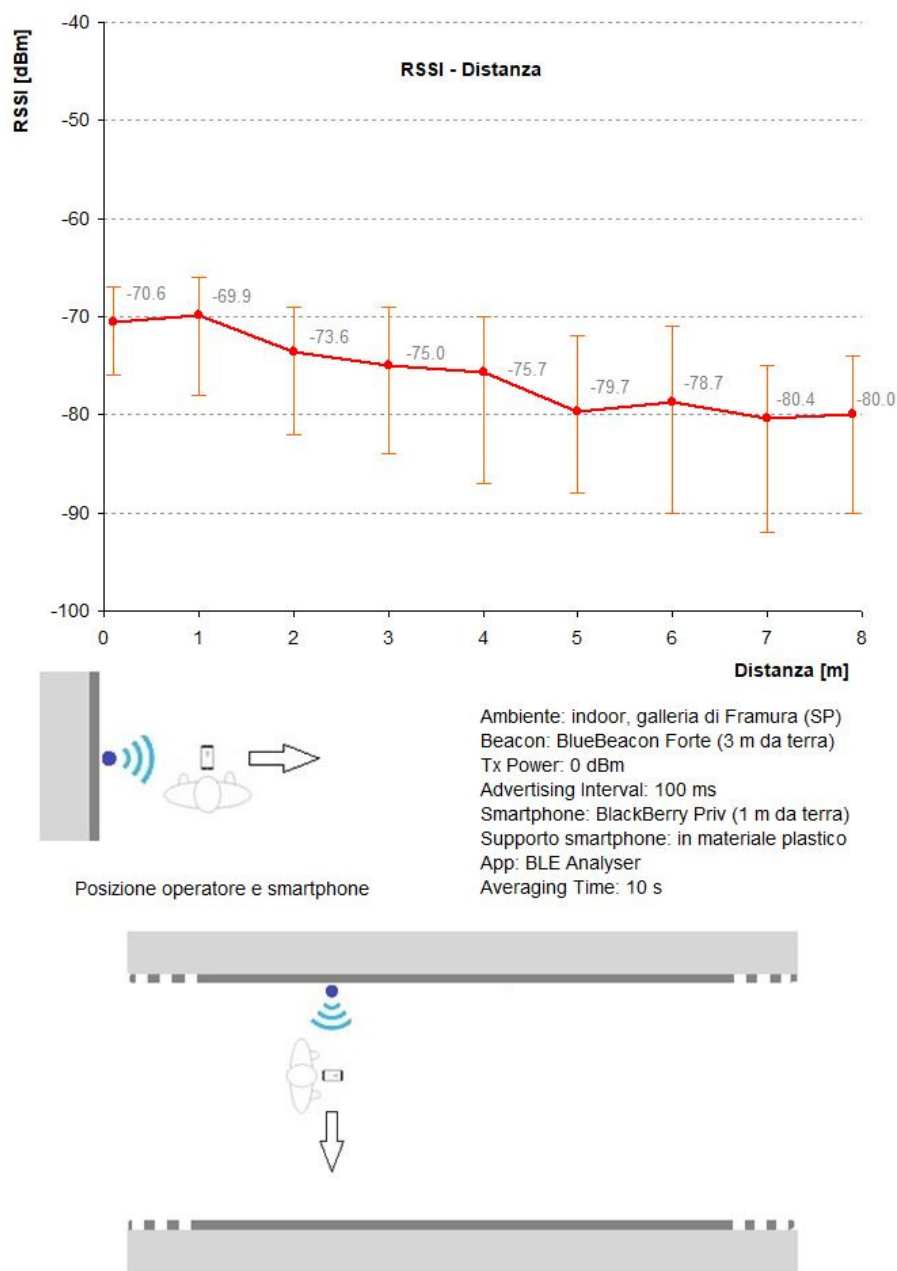


Figura 5.34: misure RSSI indoor, galleria stradale di Framura (test n° 17)

I primi test di galleria, relativi alle figure 5.31, 5.32, 5.33 e 5.34, sono stati realizzati evitando di mascherare il segnale con il corpo dell'operatore e mantenendo lo stesso orientamento smartphone-Beacon, in modo da poter osservare il comportamento RSSI senza la presenza di significative interferenze.

I test n° 14 e 15 (figure 5.31 e 5.32) sono stati realizzati spostandosi lungo la galleria a circa 1 m dalla parete. Nella prima prova i Beacon sono stati posizionati a 1.5 m da terra, mentre nella seconda l'altezza è stata di 3 m. I grafici ottenuti con questi test

presentano andamenti simili a quelli delle prove in esterno (§ 5.2.1), ovvero non sono stati registrati elevati fenomeni di riflessione. Occorre evidenziare che la curva del test n° 15, con i Beacon a 3 m di altezza, presenta il consueto appiattimento della porzione iniziale, dovuto principalmente a semplici aspetti geometrici di propagazione (maggiori distanze che si creano tra trasmettitore e ricevitore e allontanamento più graduale del ricevitore dalla fonte del segnale). Ciò nonostante l'installazione dei dispositivi ad altezze dell'ordine di 3-4 metri è da ritenersi elettiva per ridurre, almeno in parte, l'instaurarsi di condizioni *NLOS* (No Line of Sight) di propagazione del segnale radio. Naturalmente con l'aumentare dell'altezza da terra dei trasmettitori aumentano anche le difficoltà di realizzare un vero e proprio RSSI ranging e, come vedremo, sarà opportuno ripiegare su un positioning più indirizzato alla prossimità, ovvero ad una localizzazione basata sul segnale più forte o su semplici comparazioni delle potenze ricevute.

I risultati dei test realizzati trasversalmente (figure 5.33 e 5.34) presentano invece fenomeni di riflessione significativi, dovuti principalmente alla presenza delle due pareti contrapposte. Tali disturbi sono però inferiori a quelli rilevati nel corridoio universitario, in quanto in questo caso le distanze in gioco sono maggiori. Si prevedono comunque trasversalmente disturbi di localizzazione maggiori rispetto al positioning longitudinale. Si segnala inoltre che il grafico del test n° 17 (figura 5.34) presenta la stessa anomalia rilevata nel test n° 12 (figura 5.19), ovvero un incremento di potenza indesiderato a 1 metro dal Beacon; come si è detto il fenomeno probabilmente è dovuto alla parete e alle diverse risposte delle antenne in relazione al loro orientamento.

Il prossimo test (figura 5.35), eseguito con i Beacon a 3 m da terra, riporta invece i risultati RSSI rilevati da un operatore che si sposta longitudinalmente lungo la linea di mezz'ora della galleria. Nella zona di interesse sono stati installati tre Beacon a parete, in modo da formare un triangolo, così come indicato nel disegno alla base del grafico. Questa prova è stata realizzata in condizioni più simili a quelle di reale utilizzo, sia per l'orientamento del soggetto, sia per l'assenza del supporto telescopico dedicato allo smartphone, il quale è stato tenuto in mano direttamente dall'operatore. Inoltre i valori medi di potenza sono stati rilevati utilizzando un tempo di scansione più breve (1 s), in modo da avvicinarsi alle impostazioni dell'applicativo di navigazione.

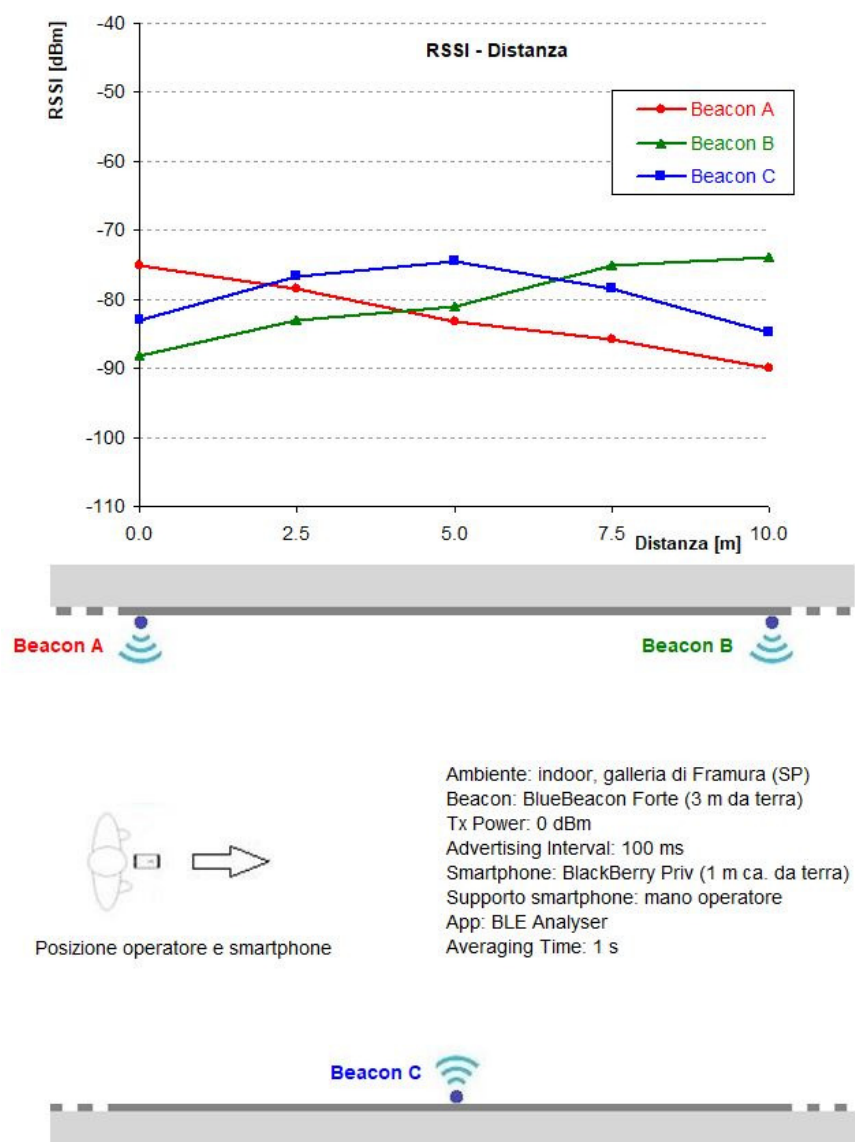


Figura 5.35: misure RSSI indoor, galleria stradale di Framura (test n° 18)

Il test di figura 5.35 ha restituito, in linea di massima, un soddisfacente comportamento dei segnali emessi dai Beacon. I dispositivi A e B individuano infatti il punto di egual potenza a circa 4 m, quindi con un errore longitudinale di circa 1 metro, mentre il dispositivo C fornisce correttamente il suo punto di massima potenza in prossimità dei 5 m. In tale posizione però le potenze fornite dai Beacon A e B risultano basse in proporzione all’RSSI fornito dal Beacon centrale, pertanto durante lo spostamento longitudinale del soggetto in galleria si prevede di ottenere un positioning deviato, alternativamente a sx e dx, verso i Beacon laterali. Come si è detto si ritiene che tali

aspetti possano essere migliorati ottimizzando l'efficienza delle antenne trasmettenti in base alla posizione d'installazione e al lobo di trasmissione desiderato.

L'esito del test, tutto sommato favorevole, è stato però ottenuto in assenza di interferenze importanti (veicoli e persone), infatti in questo caso le condizioni di propagazione *NLOS* (No Line of Sight) sono minime, in quanto limitate al corpo dell'operatore che spostandosi da A a B maschera, in alcune posizioni e solo parzialmente, il segnale del Beacon A e poi anche quello del Beacon C.

Come noto, e più volte evidenziato in questo elaborato, l'onda elettromagnetica a 2.4 GHz presenta caratteristiche di propagazione praticamente ottiche, pertanto anche modesti ostacoli lungo la linea del segnale causano disturbi e significativi cali di potenza. I riscontri dei test sul parametro RSSI si modificano quindi facilmente in presenza di qualsiasi elemento schermante, come d'altronde è stato evidenziato nel precedente test di figura 5.8 (§ 5.2.1). A tal proposito in galleria sono state eseguite misure sulla potenza del segnale anche in presenza di ostacoli, quali autoveicoli e persone. Si precisa che per mancanza di disponibilità di veicoli pesanti non è stato possibile ottenere riscontri sperimentali con tali elementi di disturbo. In ogni caso, la presenza di ostacoli, siano essi persone o veicoli, causano forti abbattimenti di potenza se si realizzano condizioni di propagazione *NLOS*.

Le immagini seguenti (figura 5.36), fornendo un quadro complessivo di tutti i segnali radio rilevati in un determinato punto della galleria, consentono di stimare l'effetto schermante del corpo dell'operatore nei confronti dei segnali emessi da determinati Beacon.

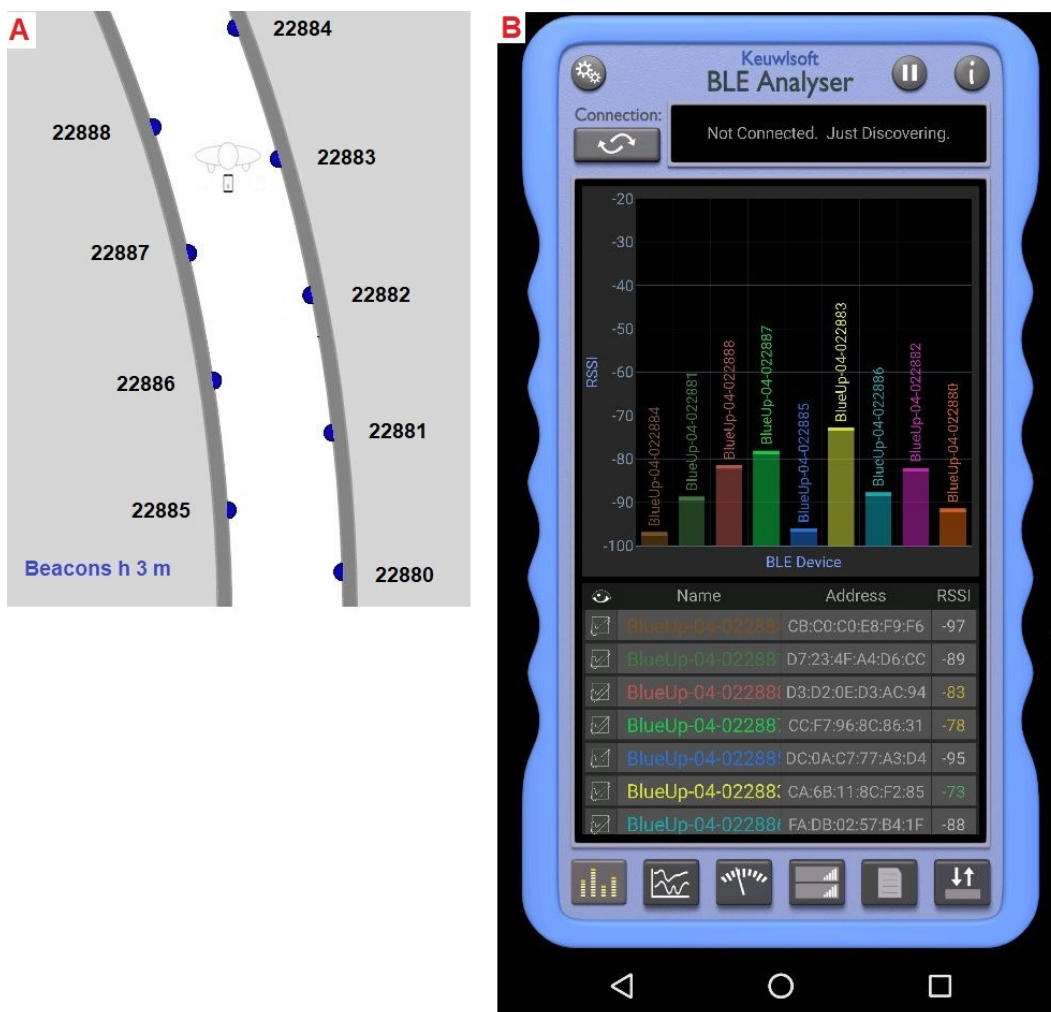


Figura 5.36: misure RSSI indoor, galleria stradale di Framura - screenshot applicativo BLE Analyser [F6] (test n° 19)

L'immagine A della figura 5.36 rappresenta un tratto di circa 40 m della galleria di Framura, nel quale sono stati installati, a 3 metri di altezza da terra, i 9 Beacon raffigurati in blu. La distanza, lungo la parete, tra un Beacon e l'altro è stata fissata a 10 m. L'immagine A, oltre a riportare i Beacon con i relativi numeri identificativi, raffigura la posizione e l'orientamento in galleria dell'operatore e del suo smartphone. Sulla destra invece, con l'immagine B, si riporta lo screenshot dell'applicativo di misura²⁶ [F6], scattato dall'operatore stesso nell'esatta posizione indicata in A.

²⁶ Si tratta di un'altra interessante funzione dell'ottimo applicativo di misura BLE Analyser, realizzato da Keuwlsoft (<http://www.keuwl.com>). In questo caso si è utilizzata la sezione *Levels*, la quale permette appunto di visualizzare su istogrammi mobili i livelli relativi a tutti i segnali BLE ricevuti dallo smartphone in una determinata posizione.

Osservando gli istogrammi dei livelli RSSI, la posizione dei Beacon e quella dello smartphone, si può facilmente comprendere il comportamento complessivo dei segnali BLE presenti in galleria. I livelli RSSI rilevati, tenendo naturalmente conto degli aspetti aleatori dell'indicatore di potenza, possono ritenersi coerenti con gran parte delle distanze in gioco, tranne al riguardo del Beacon 22884. Questo trasmettitore infatti, trovandosi completamente mascherato dal corpo dell'operatore, ha restituito un segnale decisamente basso (97 dBm) rispetto a quello di circa 84 dBm emesso dal Beacon 22882, il quale si trovava più o meno alla stessa distanza dal ricevitore, ma non risultava coperto da ostacoli.

In questo caso, l'assenza del segnale del Beacon 22884 non è particolarmente significativa ai fini del positioning, in quanto si tratta di un riferimento abbastanza distante. Pertanto l'influenza sulla localizzazione sarà minima o nulla a seconda dei valori di taglio sul segnale impostati sull'applicativo di navigazione. In ogni caso, il soggetto sarà certamente localizzato all'interno del triangolo virtuale individuato dai Beacon 22888, 22883 e 22887.

Risulta però ovvio che se il mascheramento, da parte di persone o veicoli, coinvolge uno o più Beacon vicini al soggetto da localizzare, si avranno significativi errori di positioning, con la possibilità di arrivare addirittura a temute condizioni di assenza di segnali validi, quindi senza nessun dato aggiornato da fornire agli algoritmi di posizionamento. La mancanza di dati si realizza, ad esempio, quando tutti i segnali ricevuti si abbassano a livelli non significativi o al di sotto dei valori di taglio impostati sull'applicativo di navigazione. In galleria, in base alla posizione dei Beacon e a quella dei soggetti da localizzare, le condizioni *NLOS* geometricamente più critiche si possono realizzare con la presenza di veicoli pesanti, in particolare se fermi in coda. Sono inoltre da considerare gli effetti schermanti, spesso significativi, dovuti al corpo umano, soprattutto in presenza di più persone posizionate intorno allo smartphone ricevente. L'innalzamento dell'altezza da terra dei Beacon migliora la situazione, ma sono necessarie altezze molto elevate per tentare di superare il problema, come si può osservare dalla semplificazione geometrica riportata in figura 5.37. Occorre poi tener conto che l'incremento dell'altezza si scontra con i limiti fisici delle dimensioni ambientali, con l'aumento delle difficoltà di un *ranging* su base RSSI e, in galleria, anche con aspetti di vulnerabilità dei dispositivi nei confronti di un eventuale incendio.

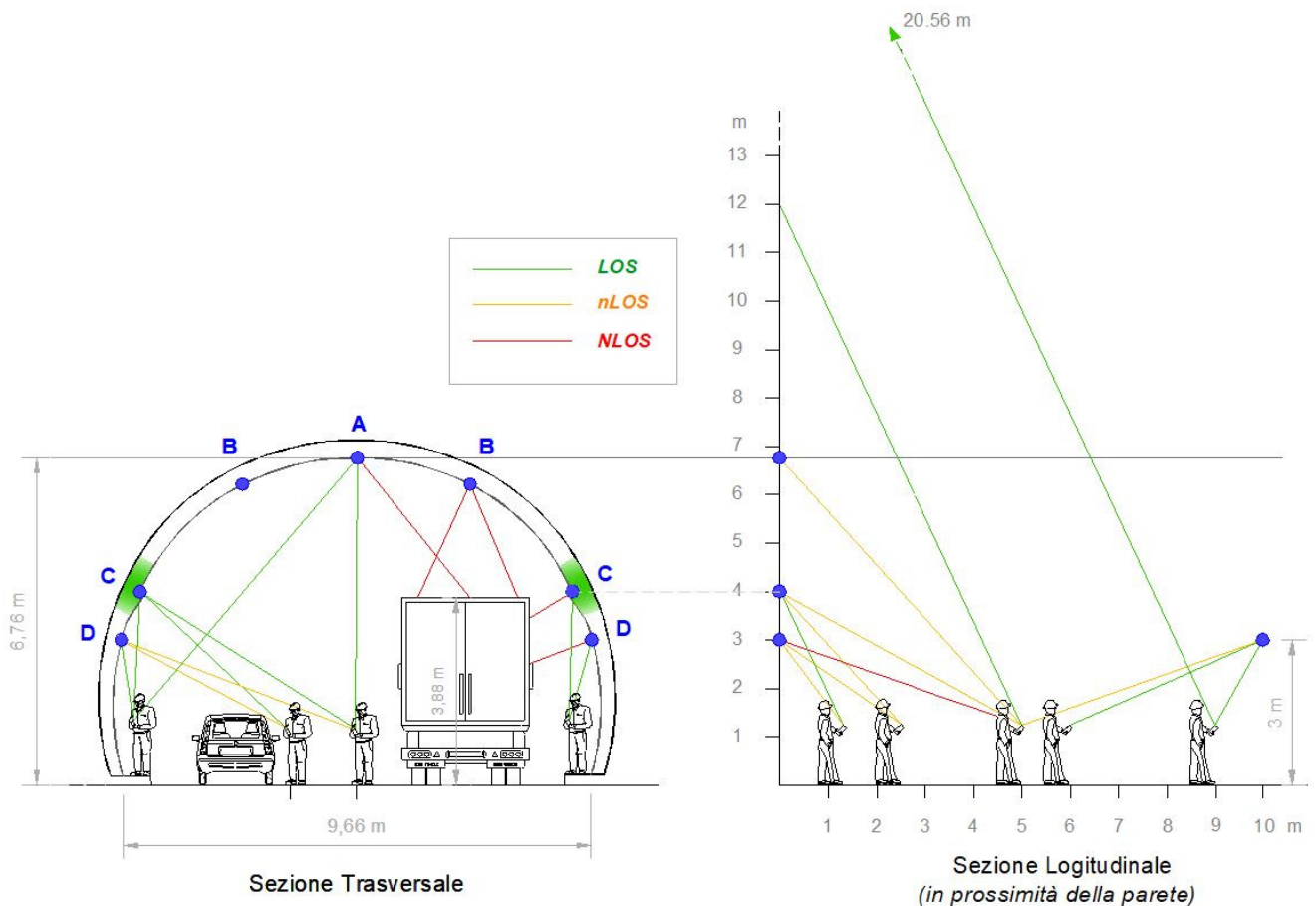


Figura 5.37: semplificazione geometrica di alcune condizioni di propagazione (*LOS*, *near-LOS* e *NLOS*) del segnale radio BLE in una tipica galleria autostradale a 2 corsie

La figura 5.37 rappresenta una semplificazione geometrica di alcune condizioni di propagazione del segnale BLE in una tipica galleria autostradale a due corsie. Premesso che il realizzarsi di condizioni *LOS* (Line of Sight), *nLOS* (near Line of Sight) o *NLOS* (No Line of Sight) è dipendente da numerosi fattori, tra cui le dimensioni della galleria e dei veicoli, è possibile prevedere comunque alcune situazioni tipiche. L'immagine della sezione trasversale evidenzia che nessun Beacon, in presenza di un veicolo pesante di elevata altezza, è in grado di fornire un segnale in linea ottica sia al soggetto al centro della carreggiata che a quello laterale sulla banchina.

Nell'immagine della sezione longitudinale si possono invece osservare alcune condizioni di propagazione relative ad un soggetto che si sposta lungo la parete di galleria in un tratto di 10 m (distanza prevista tra un Beacon e l'altro nei successivi test di navigazione). In questo caso, per ottenere una propagazione *LOS* lungo l'intero tratto, sarebbe necessario installare i Beacon ad altezze impossibili di oltre 20 m.

Accontentandosi invece di mantenere una propagazione più o meno ottica (*nLOS*) sino alla metà del percorso, potrebbero essere già sufficienti altezze dell'ordine di 4 m. Occorre inoltre precisare che i segnali giungono al ricevitore anche per riflessione, diffrazione e *scattering* (§ 4.2.4), fenomeni che da un lato disturbano la stima delle distanze (*ranging*), ma dall'altro possono risultare utili, sia per limitare il verificarsi di condizioni caratterizzate dall'assenza di segnali, sia per ripiegare strategicamente verso semplici tecniche di prossimità *Range-Free*, le quali possono individuare la posizione del soggetto in prossimità del dispositivo BLE che ha fornito al ricevitore il valore RSSI più elevato.

Riassumendo, in galleria le principali difficoltà nel realizzare una propagazione radio senza ostacoli sono dovute alle seguenti condizioni di utilizzo:

- presenza di veicoli, in particolare se si tratta di mezzi pesanti fermi in coda;
- utilizzo dello smartphone vicino al corpo e ad un'altezza da terra ridotta;
- presenza di più persone intorno allo smartphone.

Tali condizioni di utilizzo non possono essere limitate o controllate, pertanto si ritiene necessario individuare soluzioni in grado di conciliare le esigenze di affidabilità funzionale con la sostenibilità economica del sistema, in pratica individuare per i Beacon un posizionamento strategico, senza dover necessariamente installare i dispositivi BLE in molteplici posizioni di galleria. Questi aspetti potranno essere meglio affrontati dopo i successivi test di navigazione, ma sin d'ora si ritiene interessante valutare la realizzazione di un IPS che garantisca le sue funzioni solo lateralmente lungo le banchine o pareti di galleria, in pratica lungo le previste vie di esodo. La limitazione della copertura radio a tali corridoi, oltre ad indirizzare gli utenti lungo un percorso di esodo idoneo e generalmente dotato di illuminazione di sicurezza, consente di evitare le notevoli interferenze (dovute ai veicoli) che si avrebbero invece in un sistema di localizzazione operante sull'intera superficie di galleria. Restano comunque presenti e da valutare le interferenze più modeste dovute ai soggetti stessi. Naturalmente la scelta di garantire il funzionamento solo lungo le banchine comporta la necessità di informare adeguatamente l'utenza di galleria sulle aree coperte dal servizio.

La realizzazione di una soluzione di copertura radio di questo tipo, in relazione alla precedente figura 5.37, potrebbe essere attuata individuando per i Beacon una posizione, su ambo i lati di galleria, all'interno degli archi evidenziati in verde; in pratica si ritiene interessante valutare un'installazione a circa 4 metri di altezza (posizione C). Tale posizione rappresenta inoltre un soddisfacente compromesso tra propagazione del segnale, manutenibilità del sistema e aspetti di vulnerabilità dei dispositivi, sia in merito agli incendi che ad una buona parte di urti veicolari. A tal proposito si ritenuto opportuno approfondire il comportamento dell'indicatore RSSI in una situazione dove l'operatore si sposta lungo un tratto di banchina (corridoio di esodo). La figura 5.38 è relativa ad uno di questi test, nel caso specifico con i Beacon posizionati a 3 m da terra.

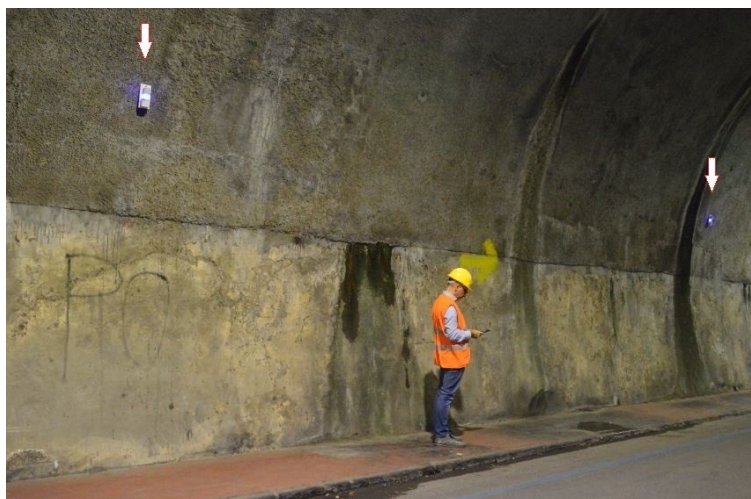


Figura 5.38: una fase dei test RSSI lungo una parete della galleria di Framura

Sono stati eseguiti diversi test lungo le pareti di galleria, posizionando i Beacon a diverse altezze e impostando diversi valori di potenza. Di seguito (figura 5.39) si riportano i risultati relativi alla configurazione con Beacon posizionati a 4 m di altezza e potenza di trasmissione impostata a 4 dBm, valore massimo selezionabile con i dispositivi BlueBeacon Forte.

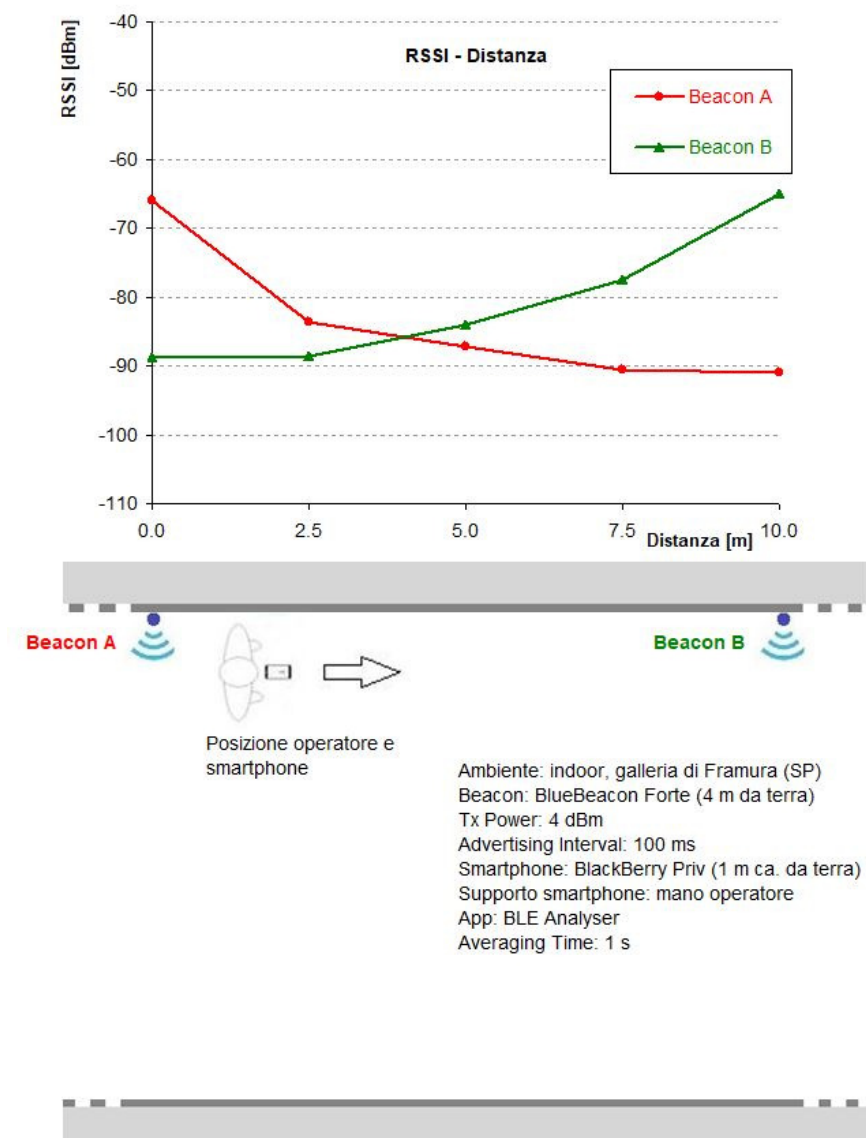


Figura 5.39: misure RSSI indoor, galleria stradale di Framura (test n° 20)

Nel test n° 20, grazie all'altezza dei Beacon, l'effetto schermante del corpo dell'operatore, nei confronti del segnale proveniente dal Beacon A, è risultato contenuto. Il test è stato ripetuto diverse volte e i risultati, se pur con le prevedibili differenze, hanno restituito comportamenti simili a quello di figura 5.39.

Ciò nonostante le condizioni di propagazione *NLOS* sono ancora presenti e contribuiscono ad aumentare gli aspetti aleatori e quindi gli errori legati all'indicatore RSSI. Se ad esempio il soggetto avvicina molto lo smartphone al proprio corpo, l'effetto schermante aumenta e con esso gli errori di localizzazione. In pratica, a seconda della posizione assunta dal soggetto e della tecnica di positioning utilizzata, la localizzazione

tenderà a spostarsi in avanti verso il dispositivo in linea ottica (Beacon B). La situazione cambia ancora se davanti al soggetto sono presenti altre persone. In ogni caso per i nostri scopi si ritiene sufficiente realizzare un positioning di prossimità, in grado di garantire la localizzazione del soggetto all'interno del tratto di spazio compreso tra i due Beacon, in pratica garantire un'accuratezza e una precisione di almeno 10 m. Ulteriori considerazioni sono comunque rimandate ai successivi risultati di indoor positioning.

5.3.3 Test di indoor positioning

I numerosi riscontri sperimentali sull'indicatore RSSI si sono rivelati molto utili per preparare al meglio i test riportati in questo paragrafo, i quali ci hanno consentito di toccare con mano il comportamento in galleria di un sistema di indoor positioning realizzato con Beacon BLE. Nei successivi paragrafi saranno invece trattate le funzioni specifiche previste per il supporto all'esodo.

Per la realizzazione dei test di localizzazione e navigazione si è deciso di posizionare i Beacon su ambo i lati di galleria, così come riportato nelle immagini di figura 5.40. La distanza in parete tra un dispositivo e l'altro è stata fissata in 10 m, mentre per l'altezza da terra sono stati utilizzati due valori: 1.5 e 3 metri; il primo ha avuto prevalentemente una funzione di confronto, mentre il secondo è stato selezionato quale altezza operativa. Si precisa che il posizionamento a 3 m da terra è stato deciso, rispetto ai 4 metri inizialmente previsti, per adeguare le grandezze in gioco, e quindi i segnali radio, alle modeste dimensioni della galleria di prova.

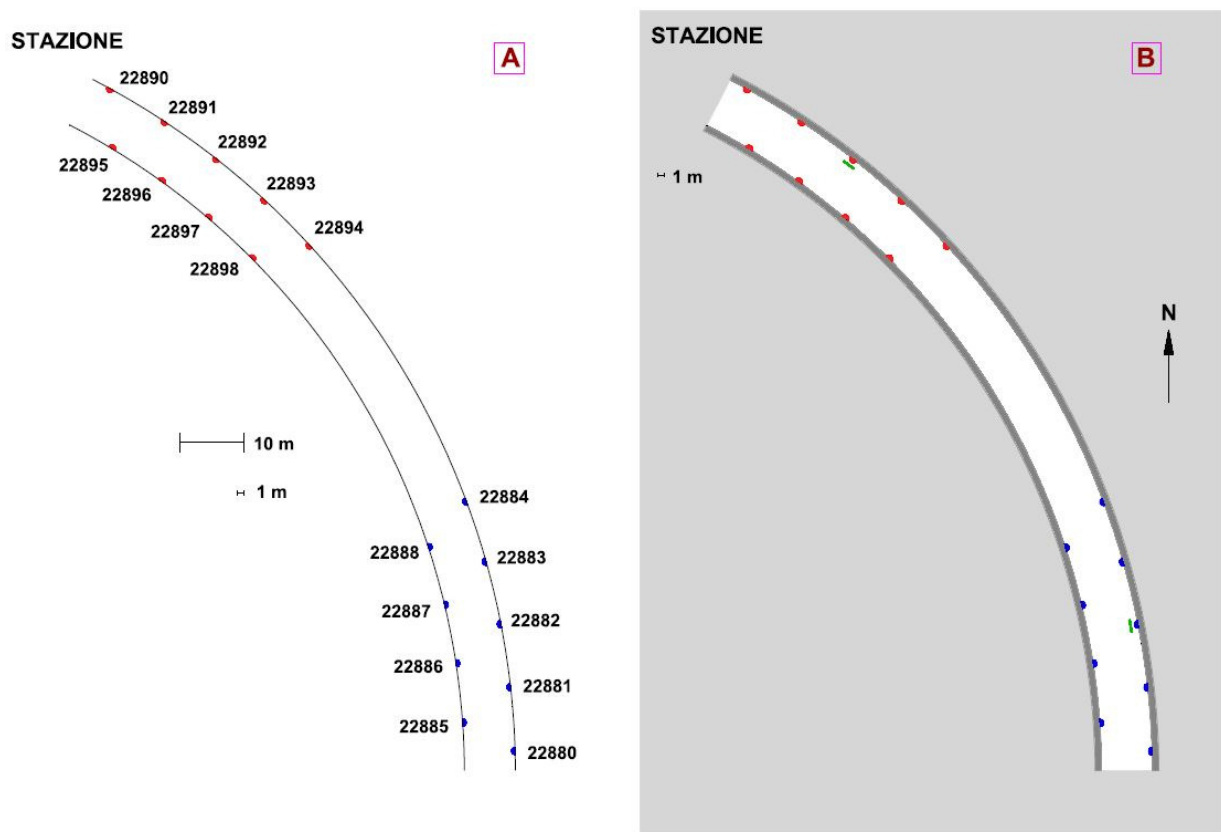


Figura 5.40: planimetria di posizionamento Beacon (A) e planimetria di navigazione (B)

In figura 5.40, l'immagine A fornisce la posizione dei Beacon con i relativi identificativi, mentre l'immagine B riporta la planimetria di navigazione utilizzata durante la sperimentazione. In questo caso, a differenza di quanto è stato fatto nel test eseguito in Sapienza (§ 5.2.2 - figura 5.22), le posizioni dei Beacon sono state riportate direttamente in planimetria. La scelta si è resa necessaria per creare dei riferimenti nei confronti delle posizioni assunte dal soggetto durante le prove, in quanto in galleria non sono presenti riferimenti geometrici, come ad esempio porte e finestre. Nella planimetria di navigazione sono stati inoltre riportati due piccoli tratti di colore verde, in prossimità dei Beacon 22892 e 22882; tali tratti rappresentano due uscite di emergenza, che in galleria sono state simulate con appositi cartelli segnaletici e luci led di colore verde. Sempre in figura 5.40, i semicerchi rossi indicano i Beacon posizionati a 1,5 m di altezza, mentre quelli blu sono relativi ai dispositivi installati a 3 m da terra.

I due gruppi di Beacon sono stati installati a sufficiente distanza (circa 50 m), in modo da mantenere separati i segnali relativi alle due condizioni sperimentali.

In base ai test preliminari e di calibrazione, sono state selezionate le impostazioni ritenute migliori, sia per i dispositivi BlueBeacon Forte che per l'applicativo di navigazione BlueBeacon Navigator Demo.

La programmazione dei dispositivi BLE, relativa ai dati identificativi e ai parametri di trasmissione, è stata la seguente :

- Formato BLE: iBeacon
- UUID: 3C883B7C8FE611E89EB6529269FB1459
- Major: 4
- Minor: 22880, 22881, 22882, 22883, 22884, 22885, 22886, 22887 e 22888 (dispositivi a 1.5 metri da terra) - 22890, 22891, 22892, 22893, 22894, 22895, 22896, 22897 e 22898 (dispositivi a 3 metri da terra)
- Advertising Interval: 100 ms
- Radio Tx Power: 0 dBm
- RSSI a 1 m di distanza: -54 dBm²⁷

Per quanto riguarda invece l'applicativo BlueBeacon Navigator Demo, nonostante le numerose funzioni offerte, si sono ottenuti complessivamente risultati soddisfacenti con impostazioni piuttosto semplici, grazie anche algoritmo proprietario di multilaterazione [F3][F7]; di seguito si riportano i parametri impostati:

- Scan Time: 0.5 s (valore minimo impostabile)
- RSSI Threshold (cut value for RSSI): -85 dBm (con Beacon posizionati a 3 m di altezza) e -90 dBm (con Beacon posizionati a 1.5 m di altezza)
- Alpha Noise (percentage of noise to remove): 10%
- Filtering Method: simple linear
- Particle Filtering: enable

Non sono stati invece utilizzati altri filtri e tecniche avanzate di supporto, quali ad esempio i filtri Kalman e i Motion Model HW-SW, questi ultimi utilizzabili per gestire

²⁷ Anche in questo caso, così come nei test eseguiti in Sapienza (§ 5.2.2), è stato stimato un valore RSSI medio di circa -62 dBm ad un metro dal Beacon, ma l'applicazione BlueBeacon Navigator Demo ha fornito prestazioni ritenute complessivamente migliori impostando riferimenti di potenza più elevati. Così come è stato descritto nella nota 25 (più di pagina), si è ritenuto opportuno impostare il parametro a -54 dBm.

modelli di movimento predeterminati, informazioni inerziali e di orientamento magnetico.

Come si è detto nella descrizione degli applicativi utilizzati (§ 5.1.1), il BlueBeacon Navigator Demo è un software dimostrativo che deve essere abilitato da BlueUp per operare su un determinato ambiente indoor. L'applicativo infatti non consente di memorizzare la planimetria e i dati relativi a ciascun Beacon (identificativo e posizione) direttamente sullo smartphone; il suo utilizzo richiede il download di tali informazioni di navigazione dal server remoto di BlueUp. Pertanto è stato necessario ricorrere alla disponibilità dell'azienda per eseguire l'upload dei nostri dati sul loro server. In pratica, prima dei test, è stato necessario posizionarsi nel raggio di portata di almeno un Beacon per consentire all'applicativo di riconoscere il dispositivo e di eseguire un breve download internet dei dati di navigazione associati. Tale procedura, esclusivamente limitata alla sperimentazione, richiede una breve connessione internet, ma risulta ovvio che in un utilizzo reale l'utente di galleria dovrà disporre di un'applicazione immediatamente funzionante e con tutti i dati già memorizzati sul proprio smartphone, in modo da non necessitare di download e di connessioni di alcun tipo.

Le prove del sistema di localizzazione illustrate in questo paragrafo sono state effettuate utilizzando uno smartphone BlackBerry Priv, ma sono stati eseguiti anche alcuni test preliminari di confronto con un Samsung Galaxy Xcover 4. Il comportamento del Samsung è risultato meno soddisfacente, in particolare in merito alla latenza di aggiornamento; tali differenze sono coerenti con le prestazioni dei due dispositivi, infatti il BlackBerry Priv dispone di un processore più veloce. In ogni caso si tratta di due modelli di smartphone risalenti a qualche anno fa, pertanto quasi tutti i dispositivi oggi in commercio presentano prestazioni più elevate.

I test in galleria, pur essendo più approfonditi, si sono svolti sulla falsa riga di quelli eseguiti in Sapienza; in pratica è stato stimato l'errore tra la posizione assunta dall'operatore e quella individuata dal sistema. Per facilitare la stima sono state scattate alcune fotografie sulle posizioni effettive dell'operatore nell'ambiente e contemporaneamente sono stati eseguiti gli screenshot relativi alla planimetria di navigazione presente sullo smartphone. Tenendo conto dei risultati emersi nei test di navigazione effettuati nel locale universitario, si è posta particolare attenzione anche

agli aspetti legati alla latenza di aggiornamento posizionale; a tal proposito, per meglio valutare le prestazioni, sono stati realizzati anche alcuni brevi filmati. Di seguito si riportano alcune fotografie (figure 5.41 e 5.42) relative al posizionamento e al controllo dei Beacon eseguito nelle fasi preparatorie della sperimentazione ufficiale del 13 ottobre 2018.

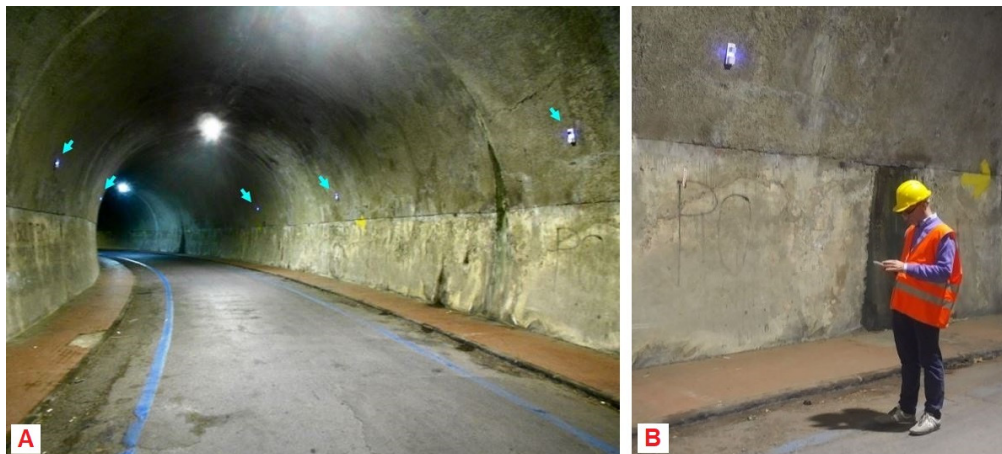


Figura 5.41: (A) tratto di galleria con Beacon posizionati a 3 m da terra; (B) fase di controllo delle impostazioni



Figura 5.42: (A) fase di posizionamento dei veicoli nel tratto di galleria con Beacon a 1.5 m da terra; (B) simulazione luminosa di un'uscita di emergenza

Al fine di semplificare i richiami ai riscontri sperimentali, tutte le prove di questa sezione si intendono appartenenti al test n° 21, pertanto nel seguito si farà riferimento direttamente al numero della figura e, ove presente, alla lettera che identifica la singola immagine all'interno della figura stessa.

Le immagini successive sono relative ai risultati ottenuti in galleria durante le prove del sistema di localizzazione; in ogni figura l'immagine A rappresenta una fotografia della posizione dell'operatore o dei soggetti in galleria, tale posizione è stata poi riportata graficamente nell'immagine B con un punto verde, mentre l'immagine C rappresenta lo screenshot dell'applicativo di navigazione, dove il doppio cerchio azzurro è relativo alla posizione individuata dal sistema. Infine l'immagine D riporta una stima approssimativa dell'errore di localizzazione, valutato visivamente durante le prove.

Le figure seguenti (5.43, 5.44, 5.45 e 5.46) sono relative ad alcuni risultati ottenuti durante le prove realizzate nel tratto di galleria con i Beacon posizionati a 1.5 m da terra.

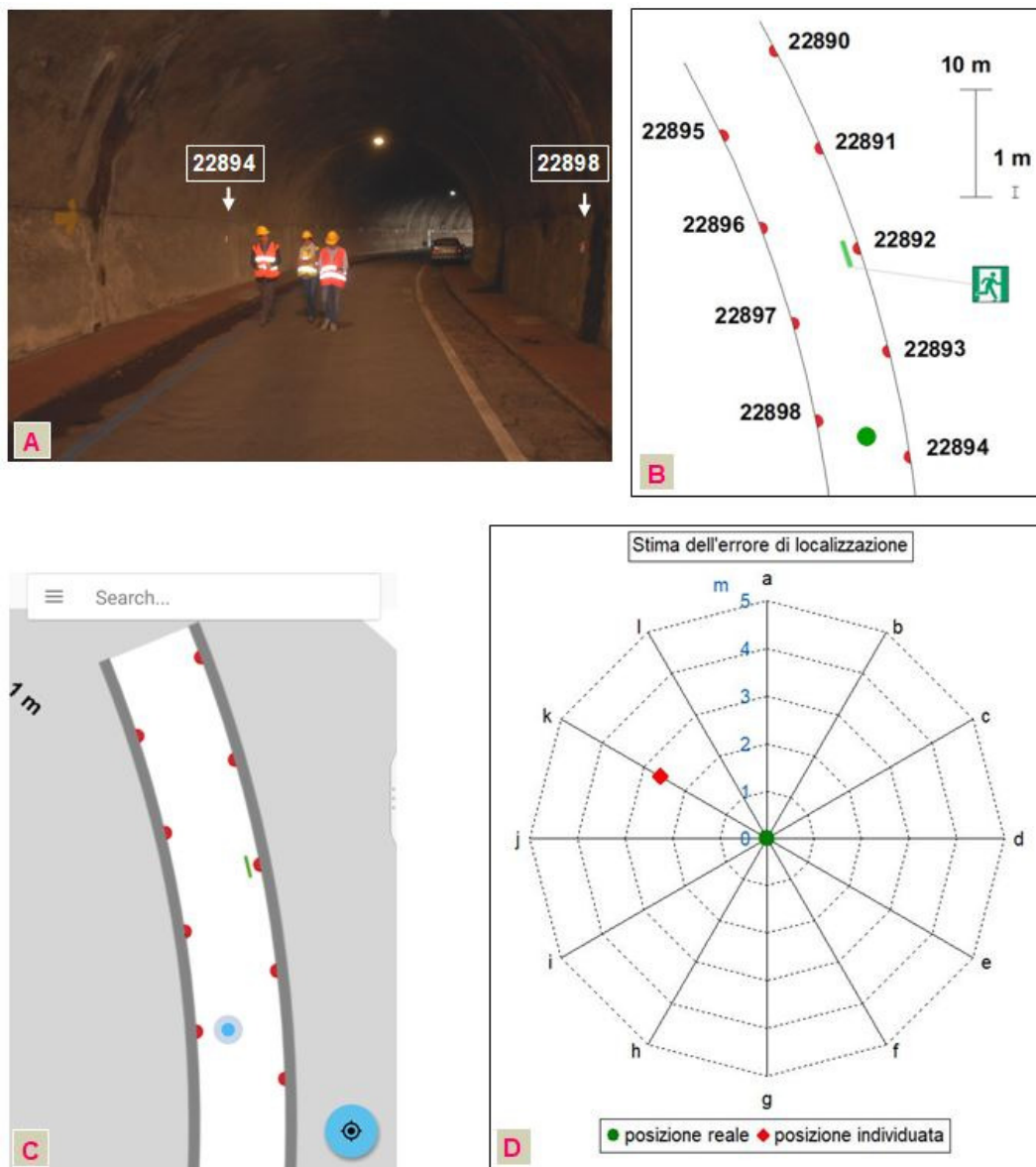


Figura 5.43: prove sperimentali di indoor positioning nella galleria stradale di Framura

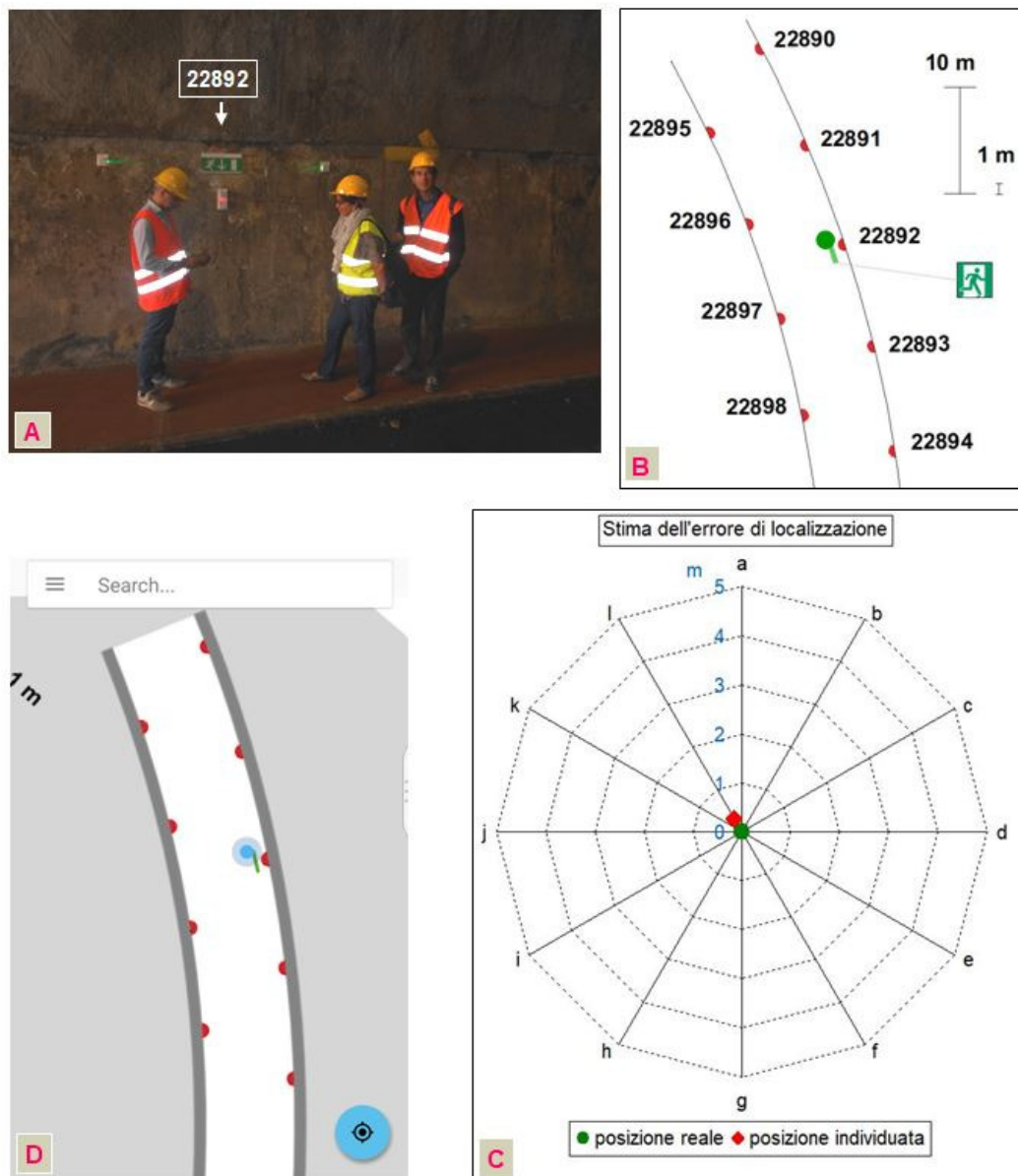


Figura 5.44: prove sperimentali di indoor positioning nella galleria stradale di Framura

La figura 5.43 è relativa ad una rilevazione effettuata percorrendo la galleria nella zona centrale della carreggiata. L'errore tra posizione reale e posizione individuata è stato stimato in circa 2-3 m. La posizione più avanzata fornita dal sistema è imputabile principalmente all'effetto schermante del corpo dei tre soggetti nei confronti del Beacon 22894 situato alle loro spalle.

In figura 5.44 i soggetti si trovano invece davanti all'uscita di emergenza; in questo caso, grazie alla vicinanza e all'assenza di ostacoli con il Beacon 22892, l'operatore è stato localizzato dal sistema con un errore prossimo a zero.

Le prossime due figure sono relative ad alcune prove eseguite percorrendo la galleria tra alcuni veicoli fermi su ambo i lati della carreggiata, al fine di osservare il comportamento del sistema in presenza di tali ostacoli.

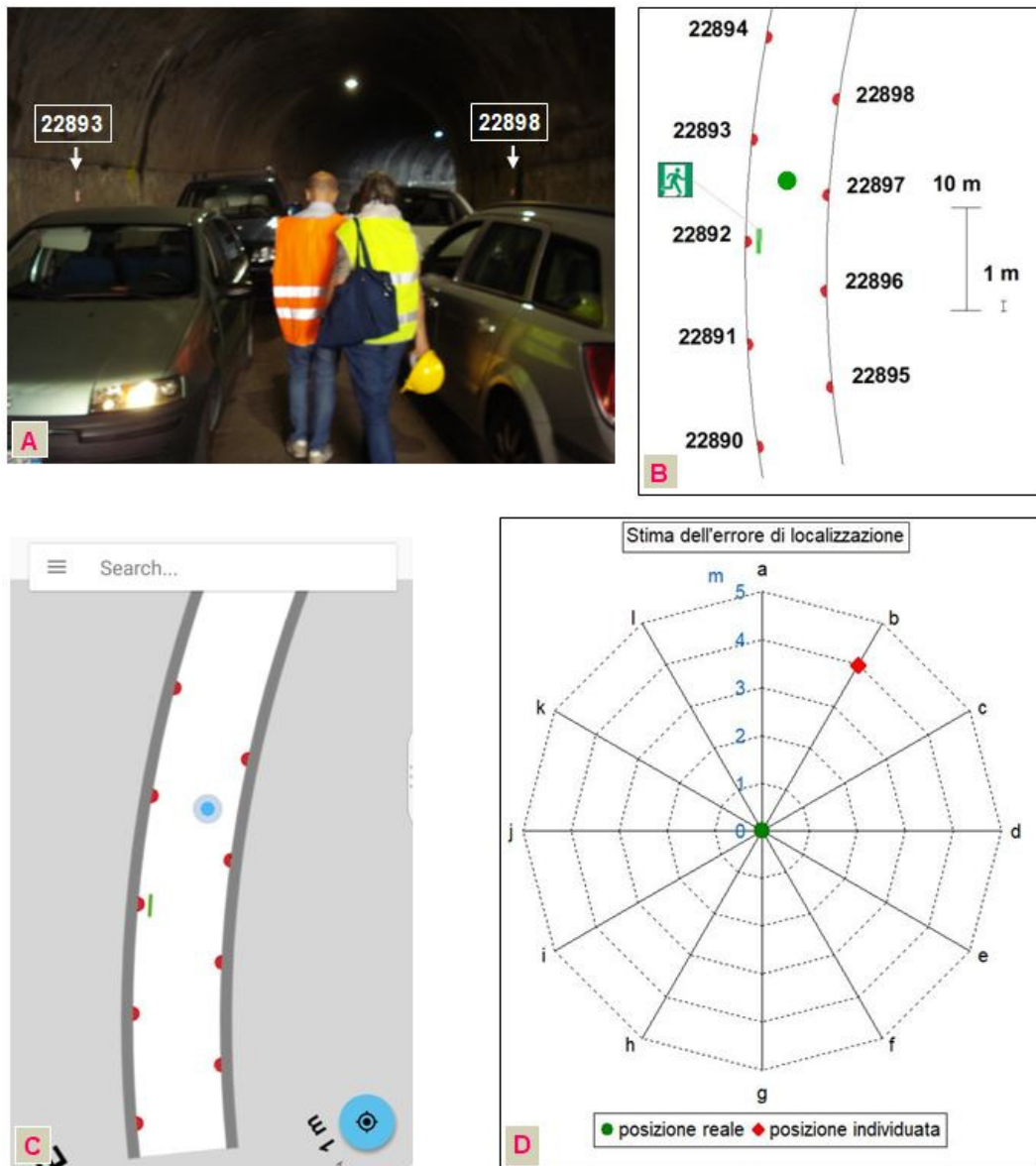


Figura 5.45: prove sperimentali di indoor positioning nella galleria stradale di Framura

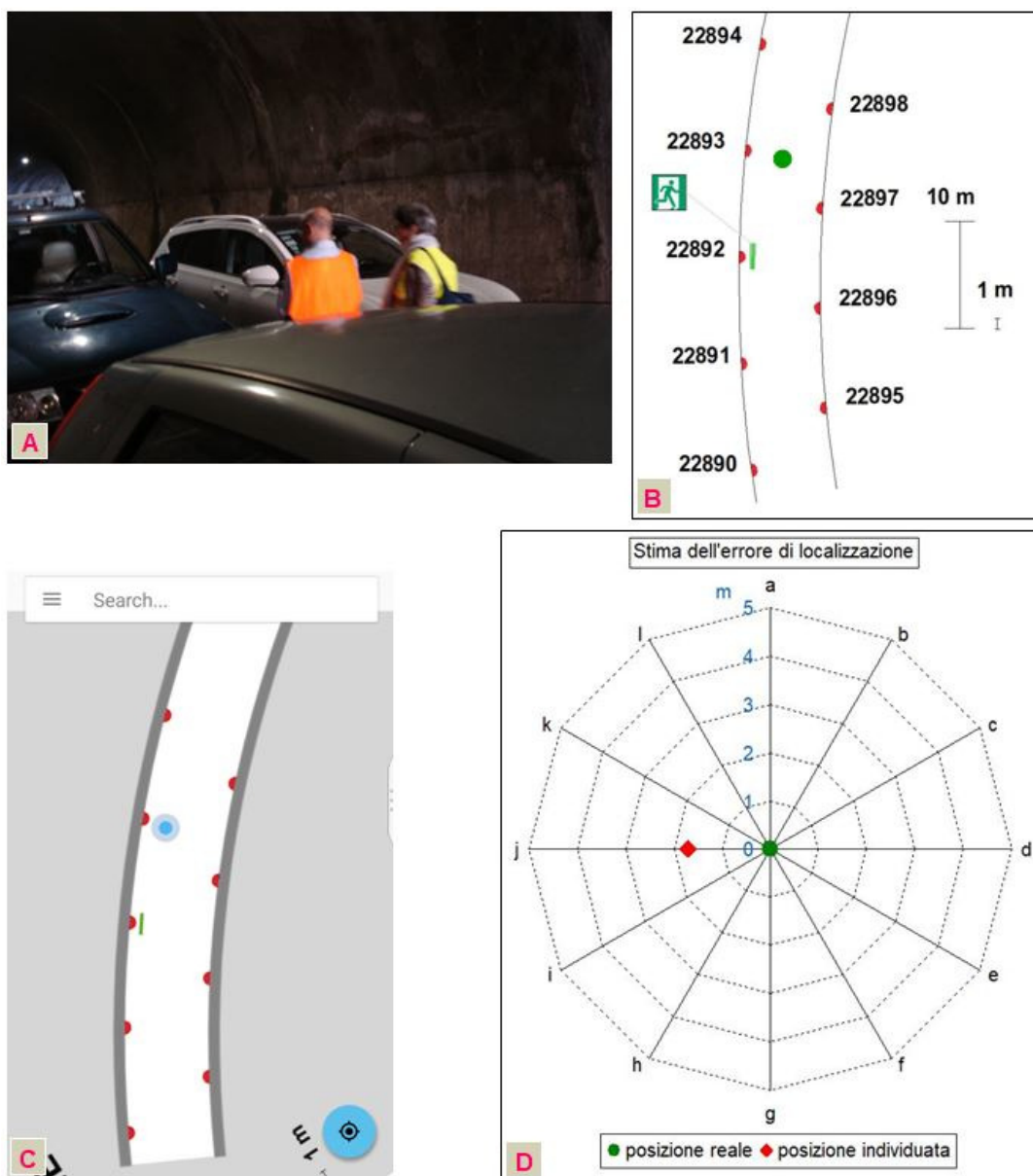


Figura 5.46: prove sperimentali di indoor positioning nella galleria stradale di Framura

Come si può osservare dalle immagini A delle figure 5.45 e 5.46 questi test sono stati eseguiti posizionando preventivamente alcune autovetture lungo la galleria, in modo da simulare una coda di veicoli fermi. I soggetti si sono quindi mossi camminando tra le autovetture per osservare e registrare la posizione individuata dall'IPS di galleria. Considerando la fitta presenza di autovetture e il posizionamento estremamente basso dei Beacon (1.5 m da terra), il comportamento è stato più che accettabile. Nella figura 5.45 gli operatori si trovano in una posizione dove i Beacon 22892 e 22897 risultano mascherati dalle autovetture o dai soggetti stessi, mentre i Beacon 22893 e 22898 (in

particolare il 22898), essendo più visibili al ricevitore, hanno indotto una localizzazione più avanzata, di circa 4 m, rispetto alla posizione reale dei soggetti. Avanzando tra le autovetture gli operatori hanno raggiunto effettivamente il Beacon 22893 (figura 5.46), il quale, essendo praticamente l'unico libero da ostacoli, ha indotto il sistema a localizzarli nelle sue vicinanze, con un errore posizionale di circa 2 m.

E' bene sottolineare nuovamente che tali risultati, se pur soddisfacenti, sono relativi ad una simulazione con autovetture, mentre in presenza di mezzi pesanti è prevedibile un comportamento decisamente più scarso e soprattutto più aleatorio.

Le figure 5.47, 5.48, 5.49, 5.50 e 5.51 riportano invece alcuni dei risultati ottenuti nel tratto di galleria con i Beacon posizionati a 3 metri da terra.

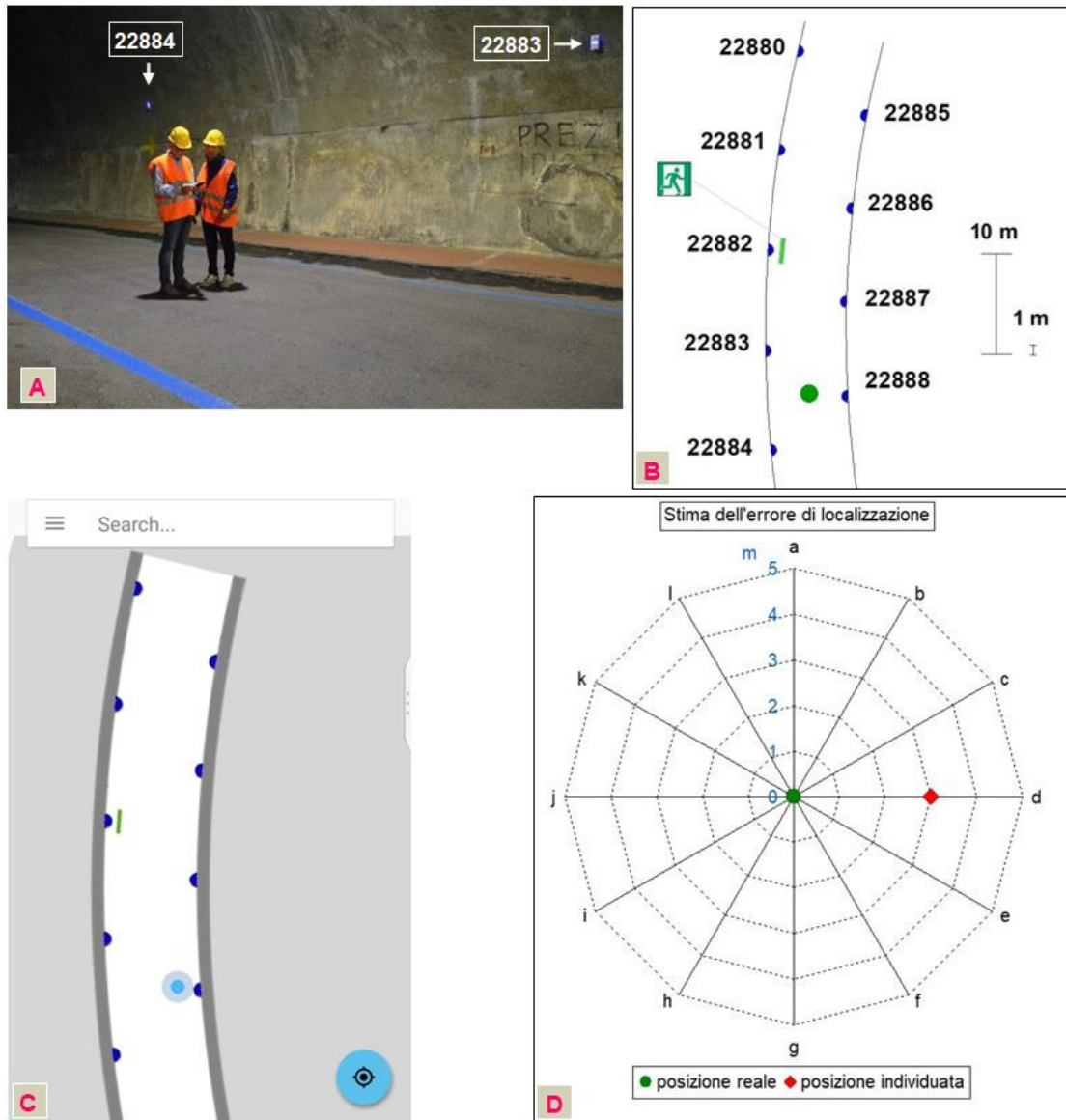


Figura 5.47: prove sperimentali di indoor positioning nella galleria stradale di Framura

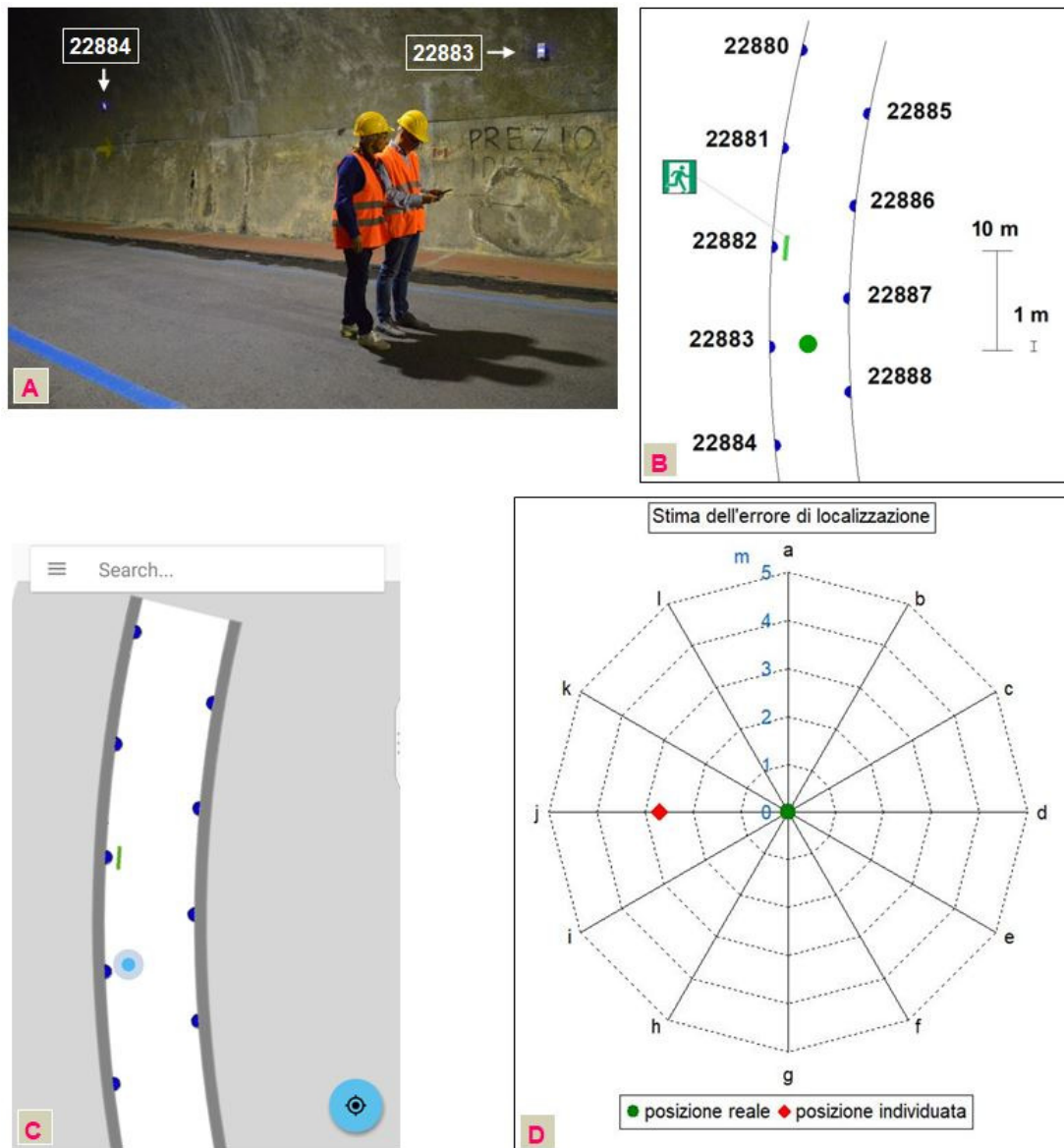


Figura 5.48: prove sperimentali di indoor positioning nella galleria stradale di Framura

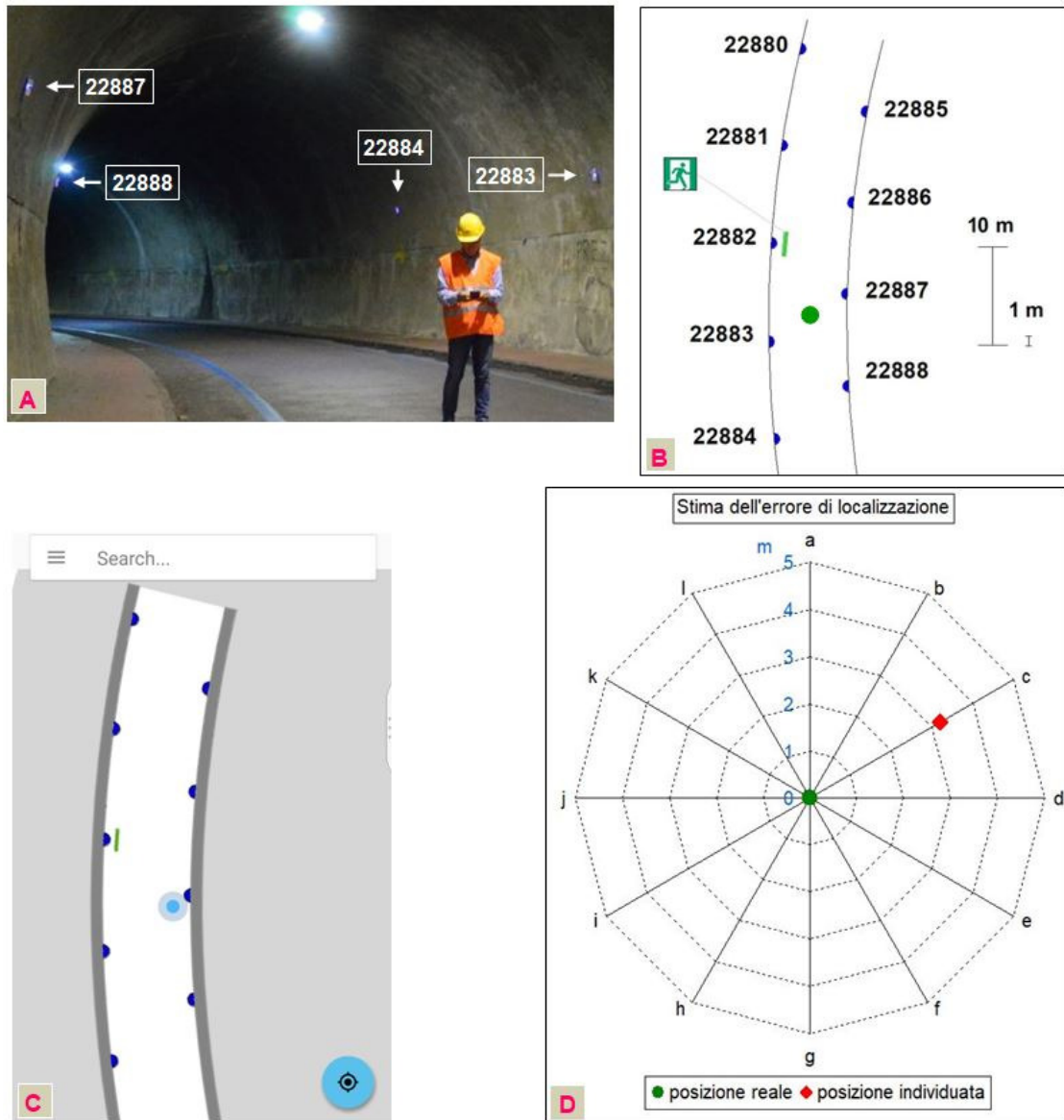


Figura 5.49: prove sperimentali di indoor positioning nella galleria stradale di Framura

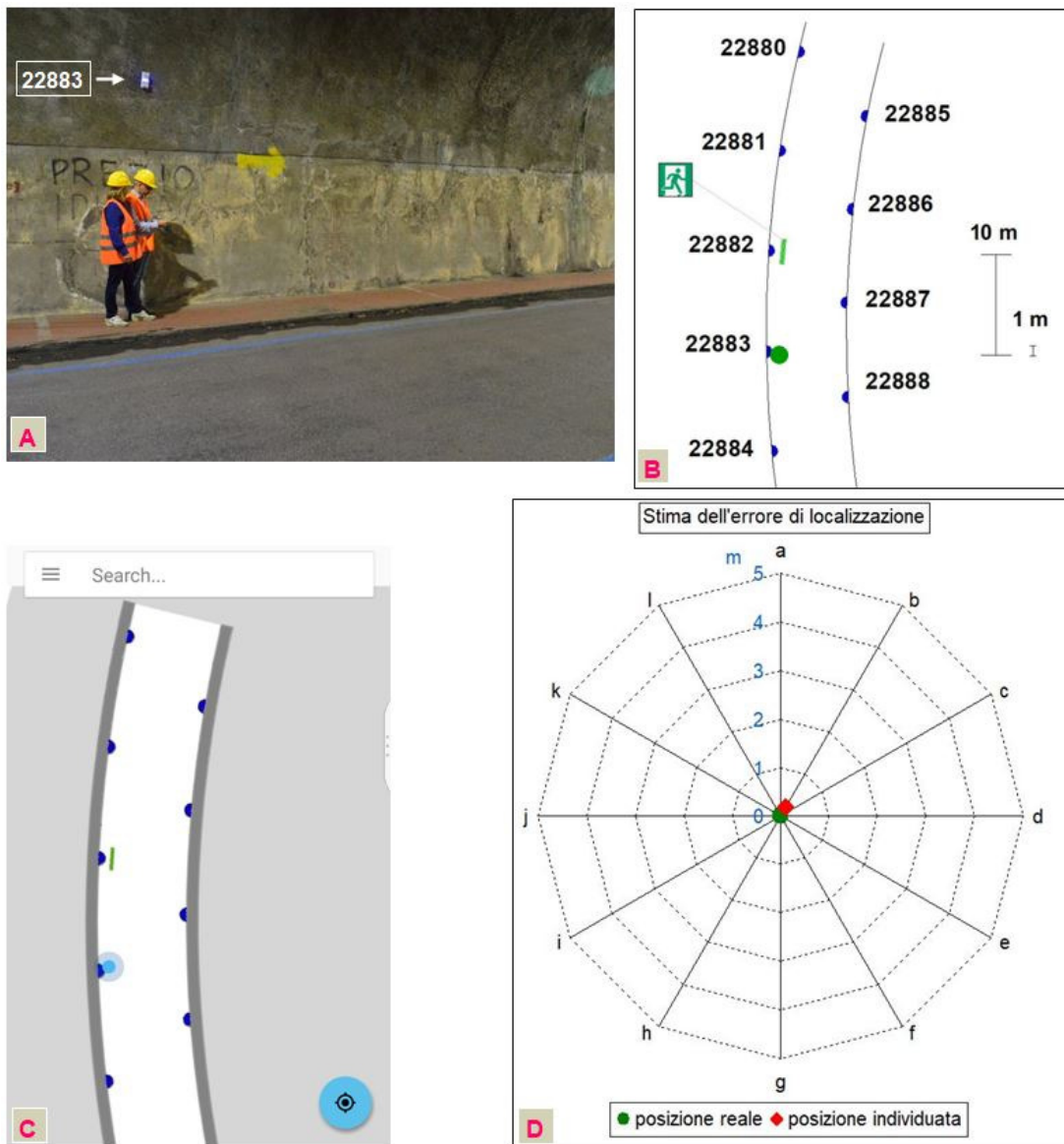


Figura 5.50: prove sperimentali di indoor positioning nella galleria stradale di Framura

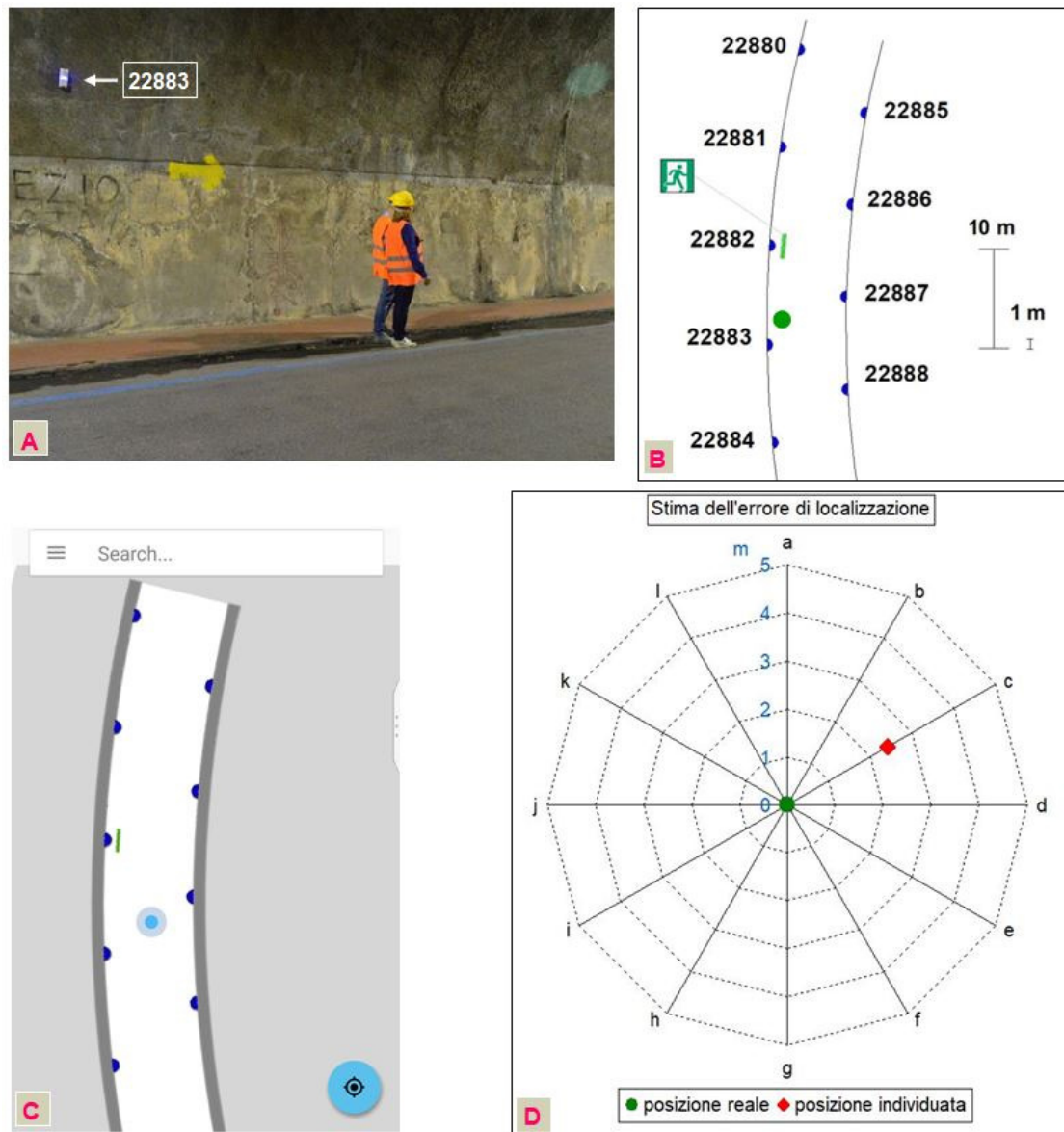


Figura 5.51: prove sperimentali di indoor positioning nella galleria stradale di Framura

Nell'immagine A di figura 5.47 gli operatori si trovano grosso modo al centro del triangolo individuato dai Beacon 22883, 22884 e 22888, ma i soggetti vengono localizzati spostati a destra di circa 3 m verso il Beacon 22888. Nel riscontro di figura 5.48 gli operatori si sono spostati in avanti di circa 5 m e il sistema si è comportato in modo simile al precedente, questa volta nei confronti del Beacon 22883 posizionato a sinistra dei soggetti. Tale ricorrente comportamento risulta coerente con i test RSSI visti precedentemente (figure 5.12, 5.32, 5.34 e 5.35), in quanto perpendicolarmente i segnali sono risultati più forti rispetto a quelli ricevuti con angolazioni significative. Come si è detto, ciò sembrerebbe dovuto ad aspetti legati all'orientamento delle antenne, ma anche

all'influenza delle contrapposte pareti. Questi aspetti saranno nuovamente ripresi, in ogni caso gli errori di posizionamento rilevati possono considerarsi accettabili in relazione alle distanze presenti in galleria.

In figura 5.49 è stato invece rilevato un errore di circa 3 m a sfavore del Beacon 22883, posizionato alle spalle dell'operatore. Il segnale di tale trasmettitore ha subito probabilmente un certo livello di schermatura da parte dell'operatore stesso.

Così come è stato rilevato con i Beacon a 1.5 m da terra, anche con il posizionamento a 3 m di altezza, l'errore si riduce praticamente a zero quando l'operatore si trova in prossimità del dispositivo BLE, come osservabile in figura 5.50. In questo caso però, grazie ad un'altezza d'installazione più elevata, risulta certamente più difficile per i soggetti vicini al Beacon mascherare il segnale radio.

Gli errori tornano a presentarsi quando i soggetti si allontanano dal riferimento radio. Infatti in figura 5.51, l'influenza del Beacon 22887 si fa sentire più del dovuto e procura un errore di positioning tra 2 e 3 metri.

Si segnala inoltre che le posizioni individuate dal sistema, come prevedibile e come evidenziato anche nel test eseguito in Sapienza, presentavano una certa instabilità nel tempo; in pratica la localizzazione del soggetto, se pur fermo nell'ambiente, variava ad ogni aggiornamento, con deviazioni posizionali sino a 3-4 metri. Tali oscillazioni, in coerenza con l'instabilità dell'indicatore RSSI, sono state molto più contenute nelle immediate vicinanze di un Beacon.

In generale gli errori di localizzazione sono stati contenuti, in quanto si sono attestati mediamente intorno ai 3-4 m, con punte di 5-6 m. Mentre in vicinanza dei Beacon (salvo mascheramenti del segnale) l'errore rilevato si può considerare trascurabile.

Durante le prove di galleria sono stati attivati anche alcuni trasmettitori radio di disturbo per osservare l'influenza sul funzionamento del sistema. Naturalmente si tratta di una semplice iniziativa, più che altro di una curiosità sperimentale, ma consapevoli della complessità dei fenomeni legati alle radio interferenze, si ritiene opportuno approfondire tali aspetti con i segnali RF effettivamente presenti in una moderna galleria autostradale. Nel nostro caso invece sono stati semplicemente utilizzati alcuni

trasmettitori BLE (Beacon BlueBeacon Forte, impostati alla massima potenza, non appartenenti al sistema di galleria) e alcuni smartphone in chiamata telefonica (nella zona iniziale di galleria, dove è presente la copertura cellulare). Nonostante i trasmettitori siano stati posizionati a poche decine di centimetri dallo smartphone di navigazione, non si sono rilevate variazioni sul funzionamento del sistema di localizzazione. Si ricorda che alcuni aspetti sulle interferenze radio e in particolare sulla probabilità di collisione tra i pacchetti dati trasmessi da due o più Beacon sono stati trattati nel paragrafo 4.4.1.

In figura 5.52 si riporta un'immagine della fase di inserimento delle batterie in due Beacon utilizzati come fonte di radio disturbo.



Figura 5.52: Beacon di radio disturbo, non appartenenti al sistema di galleria

I risultati sin qui visti sono stati ottenuti con i soggetti fermi o in lento movimento, di seguito invece si desidera fornire qualche informazione sugli aspetti dinamici della localizzazione, ovvero in merito alle impressioni rilevate dagli operatori durante la cosiddetta navigazione indoor.

Il sistema, come prevedibile, ha restituito un comportamento simile a quello rilevato durante le prove di navigazione in Sapienza (§ 5.2.2). Il positioning dinamico è risultato soddisfacente camminando lentamente (1-1.3 m/s), mentre spostandosi con passo affrettato la latenza dell'aggiornamento è risultata piuttosto elevata per poter garantire un accettabile sincronismo posizionale. Tenendo conto delle finalità applicative legate all'esodo di emergenza, dove generalmente le persone sono chiamate a muoversi velocemente, si ritiene necessario ottenere prestazioni dinamiche migliori; tali aspetti saranno comunque ripresi nel successivo paragrafo.

Percorrendo la galleria al centro della carreggiata, proprio a causa delle migliori prestazioni relative ai Beacon che si vengono a trovare lateralmente al ricevitore, la localizzazione ha restituito un andamento ondeggiante a zig-zag. Inoltre camminando lentamente si è rilevato un leggero anticipo temporale a favore del Beacon in avvicinamento davanti all'operatore. In pratica l'andamento posizionale è risultato più simile ad una localizzazione di prossimità piuttosto che a un positioning basato sulla multilaterazione dei segnali. La figura 5.53 riporta una rappresentazione grafica dell'andamento appena descritto, rilevato nel tratto di galleria interessato dal posizionamento dei Beacon a 3 metri da terra.

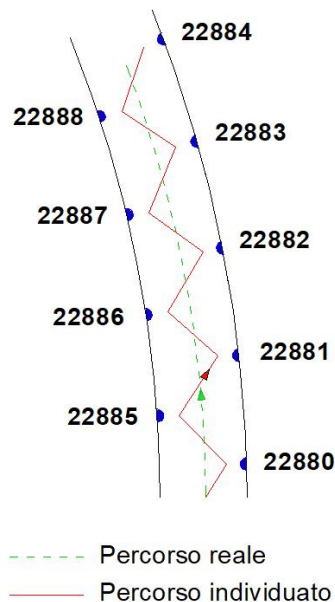


Figura 5.53: percorso reale e percorso individuato dal sistema di localizzazione (Beacon a 3 m da terra)

Successivamente alla sperimentazione del 13 ottobre sono stati eseguiti ulteriori test posizionando i Beacon a distanze più ravvicinate ed esaltando intenzionalmente la localizzazione di prossimità, attraverso opportune modifiche alle impostazioni dell'applicativo di navigazione precedentemente selezionate. Considerando il nostro particolare interesse sul funzionamento lungo le banchine, tali ulteriori prove sono state focalizzate prevalentemente lungo una parete di galleria.

Per i test è stata utilizzata la stessa planimetria di navigazione di figura 5.40, quindi ravvicinando i Beacon la posizione individuata dal sistema non poteva corrispondere a

quella realmente assunta in galleria, pertanto si è tenuto conto solo dei riferimenti posizionali forniti dai Beacon stessi riportati in planimetria. L'applicativo di navigazione invece non ha incontrato problemi modificando la posizione d'installazione dei Beacon, in quanto l'algoritmo fornisce il posizionamento attraverso una stima pesata dei valori RSSI ricevuti. Infine, per vincolare il positioning lungo una parete, in modo da simulare una planimetria di galleria linearizzata, come vedremo di nostro interesse (§ 5.4.3), sono stati disalimentati i Beacon posizionati sulla parete opposta.

Tra le numerose prove eseguite, limitatamente allo spostamento del soggetto lungo la banchina di galleria, si evidenzia il soddisfacente risultato ottenuto con le seguenti impostazioni e condizioni sperimentali:

Dispositivi BlueBeacon Forte:

- altezza da terra da 3 a 4 m
- posizionamento a parete con antenna rivolta verso il basso;
- distanza tra i dispositivi 5 m;
- Advertising Interval: 100 ms;
- Radio Tx Power: 0 dBm (Beacon a 3 m da terra) e 4 dBm (Beacon a 4 m da terra).

Applicativo BlueBeacon Navigator Demo:

- Scan Time: 0.5 s
- RSSI Threshold (cut value for RSSI): -75 (Beacon a 3 m da terra) e -85 dBm (Beacon a 4 m da terra);
- Alpha Noise (percentage of noise to remove): 10%
- Filtering Method: max value
- Particle Filtering: enable

In figura 5.54 si riportano 3 coppie di immagini relative ad alcuni risultati ottenuti con le impostazioni sopra descritte, in particolare con Beacon posizionati a 3 m di altezza e distanziati tra loro di 5 m.

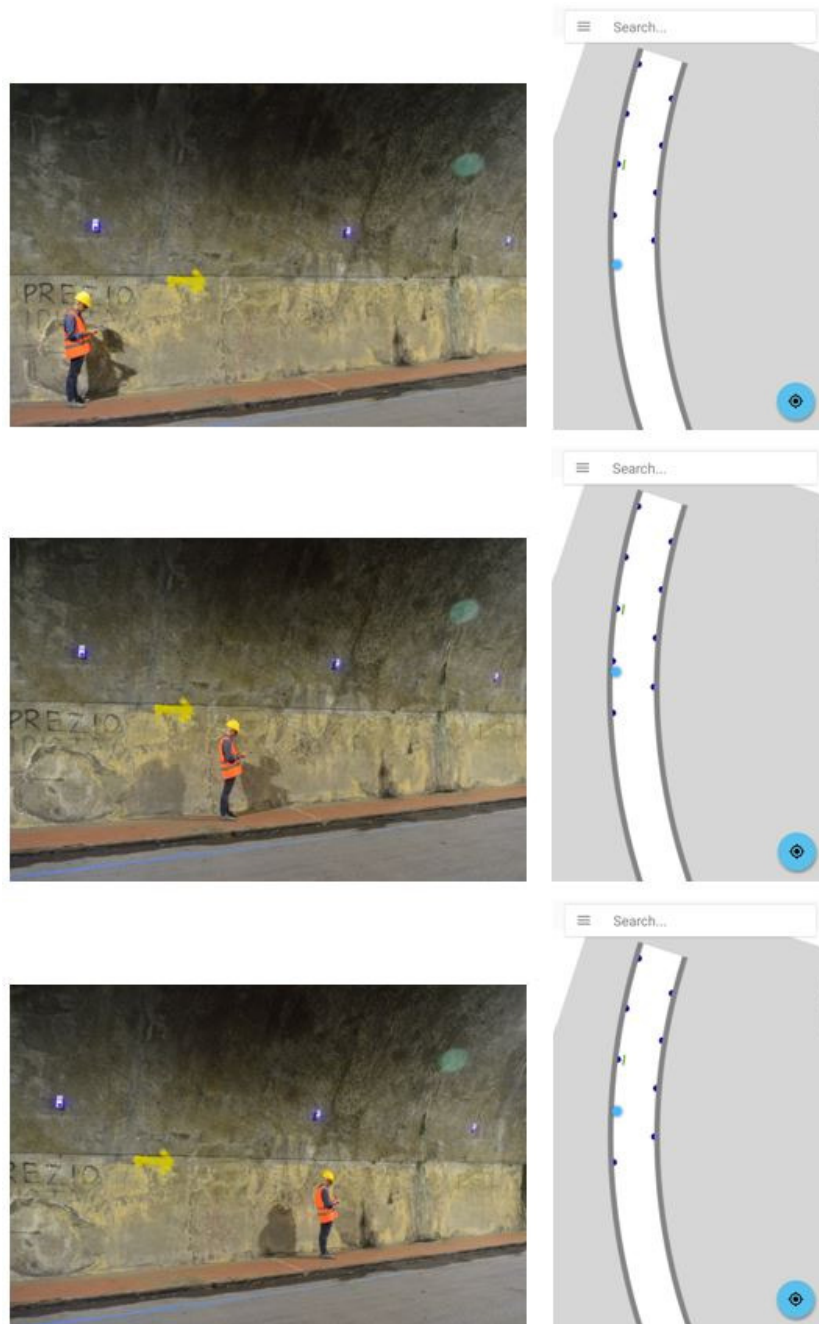


Figura 5.54: successive prove di indoor positioning nella galleria di Framura (Beacon distanziati di 5 m e impostazioni app di navigazione per funzionamento di prossimità)

Come atteso, si è avuto un comportamento prevalentemente di prossimità, infatti la posizione del soggetto veniva individuata vicino al Beacon che forniva il segnale più forte. Gli errori difficilmente hanno superato i 2-3 m (circa la metà della distanza tra un Beacon e l'altro) in presenza di un solo soggetto, mentre hanno raggiunto i 4-5 m quando intorno allo smartphone erano presenti alcune persone, a causa dell'effetto schermante delle stesse. A tal proposito si ritiene necessario approfondire gli aspetti

legati ai disturbi dovuti alle persone (condizioni di propagazione *LOS* e *NLOS* incontrollate) con ulteriori sperimentazioni in galleria, in pratica attraverso vere e proprie simulazioni di esodo, in presenza di numerosi individui.

Al riguardo invece delle impressioni di navigazione, il comportamento dinamico, viste le impostazioni selezionate sull'app, ha restituito un funzionamento prevalentemente a scatti, ma con una latenza di aggiornamento migliore rispetto a quanto rilevato nei test precedenti. In pratica il soggetto camminando è stato di volta in volta localizzato in prossimità del Beacon più vicino. Si ritiene che un funzionamento di questo tipo, grazie alla breve distanza presente tra i Beacon, possa essere utilizzato con soddisfacenti risultati nell'applicazione di galleria prevista in questo progetto di ricerca. Questi ultimi test sono stati realizzati sia con il solito BlackBerry Priv che con un recente smartphone Xiaomi Redmi Note 7, il quale, grazie alle prestazioni più elevate, ha restituito un migliore comportamento generale, in particolare in merito alla latenza di aggiornamento posizionale. Si precisa che installando i Beacon ad altezze inferiori a 3 m sono stati rilevati aumenti dei disturbi dovuti all'instaurarsi di condizioni di propagazione *NLOS*, mentre con altezze superiori a 4 m è stato riscontrato un decadimento delle prestazioni di localizzazione, nonostante la potenza di trasmissione dei dispositivi BLE sia stata aumentata a 4 dBm. Pertanto, con i dispositivi utilizzati e nelle condizioni di prova, l'altezza che ha restituito i migliori risultati sperimentali viene individuata in 3.5 m da terra.

I test di positioning e navigazione sin qui illustrati sono stati eseguiti con la funzione di orientamento della planimetria a nord disattivata. Tale funzione, disponibile nell'applicativo di navigazione dimostrativo, risulta molto utile per consentire di orientarsi meglio nell'ambiente di navigazione. Nelle prove è stato però utilizzato prevalentemente un orientamento manuale della pianta di galleria, in modo da poter meglio eseguire gli screenshot nelle posizioni di interesse e stimare l'errore di localizzazione. In ogni caso la funzione, testata successivamente, ha restituito una soddisfacente impressione di navigazione, ma l'orientamento magnetico, come prevedibile, è stato perturbato diverse volte, in particolare in vicinanza delle masse metalliche delle autovetture. Gli aspetti sulla necessità di avere una planimetria orientata

saranno ripresi nel successivo paragrafo 5.4.3, nel quale, per completezza, saranno riportate anche alcuni screenshot del BlueBeacon Navigator Demo effettuati con la funzione di orientamento automatico attivata.

Si conclude il presente paragrafo con una foto dei partecipanti alla sperimentazione di galleria del 13 ottobre 2018 (figura 5.55). Nei prossimi paragrafi verrà affrontato il perfezionamento del sistema per renderlo idoneo a supportare l'utenza di galleria, in particolare in merito all'esodo, sia in condizioni ordinarie che di emergenza.



Figura 5.55: partecipanti alla sperimentazione del 13 ottobre 2018 nella galleria di Framura (SP)

5.3.4 Sintesi dei risultati e relative considerazioni

I riscontri relativi alle prove del sistema di localizzazione in galleria sono stati commentati puntualmente dopo ogni fase della sperimentazione, in ogni caso si ritiene opportuno riassumere brevemente i risultati e le considerazioni principali.

Sperimentazione del 13 ottobre 2018

Il comportamento del sistema ha restituito risultati con errori di localizzazione contenuti, mediamente dell'ordine di 3-4 metri, con punte di 5-6 m nelle situazioni più critiche, ad esempio in presenza di autoveicoli fermi. Si evidenzia inoltre che nelle immediate vicinanze di un dispositivo BLE, in assenza di schermature del segnale da parte di veicoli o persone, l'errore è stato generalmente trascurabile.

Come prevedibile, il posizionamento dei dispositivi BLE a 3 m da terra, rispetto al posizionamento ad altezze inferiori, ha restituito un comportamento più stabile, ovvero meno affetto da situazioni di mascheramento del segnale (*NLOS - No Line of Sight*).

Complessivamente, in considerazione delle distanze presenti in galleria, il giudizio sul positioning statico (o con lenti spostamenti del soggetto) si può ritenere soddisfacente.

Il comportamento dinamico, ovvero durante la cosiddetta navigazione indoor, si può invece considerare soddisfacente solo camminando con andatura medio-bassa (1-1.3 m/s), mentre aumentando il passo o correndo è stata riscontrata una proporzionale ed evidente perdita del sincronismo posizionale.

Test successivi (lungo le banchine di galleria)

Come si è visto, i test lungo le pareti di galleria sono stati realizzati posizionando i Beacon ad altezze da terra di 3-4 m, mentre la distanza tra i dispositivi è stata ridotta a 5 m. Inoltre i parametri dell'applicativo di navigazione sono stati impostati per un funzionamento più indirizzato ad una localizzazione di prossimità che ad un vero e proprio ranging su base RSSI con multilaterazione dei segnali. I risultati, come prevedibile, hanno restituito un positioning con soluzioni di continuità più evidenti (presenza di scatti), ma certamente soddisfacenti per l'applicazione prevista. In particolare gli errori di localizzazione si sono attestati intorno a 2-3 m, con punte di 4-5 m, inoltre si è ottenuta una latenza inferiore rispetto ai test precedenti, con un sincronismo posizionale più idoneo a seguire gli spostamenti del soggetto lungo la galleria. In ogni caso si ritiene che gli aspetti sull'aggiornamento del positioning debbano essere approfonditi e migliorati, in quanto è opportuno ridurre ulteriormente la latenza in considerazione dell'applicazione prevista.

Considerazioni e definizione dei prossimi passi

E' doveroso evidenziare che nell'interpretazione dei risultati occorre tener conto dei limiti sperimentali, in particolare in merito alle risorse impiegate; ad esempio è necessario tener presente le modeste dimensioni della galleria di prova e l'indisponibilità di veicoli pesanti, utili per comprendere al meglio il comportamento del sistema in condizioni rilevanti di propagazione *NLOS*.

In ogni caso, ritenendo migliorabili sia gli aspetti di propagazione del segnale che il comportamento dinamico, si ritiene meritevole proseguire nello sviluppo del progetto di ricerca.

La realizzazione di una distribuzione radio ad elevata densità di punti di riferimento e una geometria ambientale relativamente semplice, come quella di una galleria stradale, hanno reso possibile compensare, in buona parte, le criticità legate alla propagazione indoor dei segnali radio e in particolare all'imprevedibilità insita nell'indicatore RSSI. Il comportamento radio, basato sulla potenza del segnale ricevuto, conserva comunque la sua vulnerabilità alle condizioni ambientali, pertanto si ritiene necessario irrobustire l'affidabilità di funzionamento rispetto alle condizioni sperimentali del 13 ottobre 2018.

In estrema sintesi, oltre alla necessità di migliorare l'aggiornamento posizionale, si ritiene opportuno irrobustire il sistema nei confronti delle temute condizioni di propagazione *NLOS*, ad esempio limitando la fruizione del servizio di localizzazione alle banchine laterali di galleria. Inoltre si ritiene interessante valutare l'utilizzo di particolari planimetrie di navigazione linearizzate, in modo da migliorare la localizzazione e allo stesso tempo semplificare le informazioni da fornire all'utente. Questi aspetti saranno affrontati nei prossimi paragrafi nell'ambito del perfezionamento delle funzioni di base, prima quindi di trattare l'implementazione delle funzioni avanzate, studiate appositamente per supportare l'esodo.

Si ricorda inoltre (§ 4.1) che il sistema proposto si presta ad essere supportato anche da altre tecnologie di localizzazione e più in generale da compensazioni *sensor fusion*, basate sui dati ottenibili dai numerosi sensori presenti in un moderno smartphone (accelerometro, giroscopio, sensori magnetici, videocamera, ecc.). Simili soluzioni di irrobustimento dell'affidabilità sono però rimandate ad eventuali studi e approfondimenti futuri, in quanto nel presente progetto di ricerca si desidera, prima di tutto, ottimizzare l'utilizzo dei Beacon BLE.

5.4 Il perfezionamento del sistema e lo sviluppo delle funzioni di supporto all'esodo

Grazie alle caratteristiche dei Beacon e alla semplice geometria di galleria, il sistema di localizzazione individuato è stato in grado di fornire complessivamente risultati soddisfacenti. Sono però necessari miglioramenti per poter ottenere un sistema idoneo ad affrontare future e doverose prove in campo, ad esempio in una galleria autostradale di medie dimensioni. A tal proposito, per quanto riguarda la funzione base di localizzazione, si ritiene necessario intervenire sui seguenti aspetti:

- riduzione delle condizioni di propagazione *NLOS*;
- aumento dell'affidabilità della localizzazione;
- miglioramento degli aspetti legati alla latenza e in generale all'aggiornamento posizionale;
- ottimizzazione delle antenne trasmettenti dei dispositivi BLE per la specifica applicazione.

I primi due punti saranno affrontati nei prossimi paragrafi. Al riguardo invece dell'aggiornamento posizionale e delle caratteristiche delle antenne trasmettenti, pur rimandando a studi e approfondimenti futuri, si ritiene che le criticità rilevate possano essere sufficientemente superate.

In particolare per quanto riguarda le antenne, visto l'avanzato stato dell'arte, non si ravvedono significativi problemi nel realizzare elementi radianti ottimizzati per la specifica applicazione di galleria, in pratica antenne con lobi di trasmissione studiati in base alla posizione d'installazione e all'area di copertura radio desiderata. A tal proposito si ricorda anche quanto è stato detto in merito alla recente versione Bluetooth 5.1 (§ 4.4), la quale con l'utilizzo di antenne trasmettenti multiple consente di rilevare addirittura l'angolo di partenza del segnale BLE. Questa nuova caratteristica, introdotta nello standard proprio per aiutare lo sviluppo di sistemi di indoor positioning, consentirà di migliorare significativamente le prestazioni ottenute in questa prima sperimentazione di galleria.

In merito invece all'aggiornamento posizionale gli aspetti sono decisamente più articolati, in quanto occorre tener conto di più fattori. Un macro parametro da

considerare è certamente la latenza complessiva del sistema, che a sua volta dipende dalle impostazioni e dalle prestazioni dei dispositivi utilizzati, in particolare dall'intervallo di trasmissione, dall'intervallo tra le scansioni, dalla finestra di scansione, dall'impegno computazionale richiesto dagli algoritmi di positioning e dalla potenza di calcolo dello smartphone. Si tratta di aspetti particolarmente complessi, la cui trattazione esula dallo scopo principale di questo progetto di ricerca, in ogni caso per completezza si riportano alcune considerazioni. Generalmente semplici impostazioni di bassa latenza, non adeguatamente compensate, conducono facilmente a perdite di accuratezza e precisione della localizzazione; ad esempio una riduzione della finestra di scansione, non compensata da una riduzione dell'intervallo di trasmissione, non consente di eseguire un adeguato numero di letture dell'indicatore RSSI. Viceversa finestre di scansione lunghe incrementano la latenza e non sono idonee a fornire localizzazioni dinamiche sincronizzate con gli spostamenti del soggetto.

Inoltre occorre osservare il problema anche dai seguenti due punti di vista:

- potenzialmente un aggiornamento posizionale frequente consente di ottenere un positioning più sincronizzato con gli spostamenti del soggetto;
- viceversa un positioning aggiornato frequentemente, vista la variabilità nel tempo dell'indicatore RSSI, restituisce generalmente sulla mappa di navigazione oscillazioni indesiderate del marcatore posizionale, spesso fastidiose e di difficile interpretazione.

Generalmente si ricorre a scelte di compromesso tra accuratezza, sincronizzazione e stabilità del marcatore. In determinati casi, ad esempio quando sia accettabile l'utilizzo di una localizzazione di prossimità affetta da soluzioni di continuità, si possono prevedere frequenti letture ed elaborazioni dell'indicatore RSSI, mostrando però all'utente un aggiornamento posizionale solo quando i segnali ricevuti sono coerenti con un significativo spostamento del soggetto. In questo modo, pur perdendo in accuratezza e continuità di localizzazione, si migliora la stabilità del marcatore posizionale, fornendo prontezza di aggiornamento solo quando gli spostamenti del soggetto risultano superiori ad un determinato valore di soglia. Si ritiene interessante valutare un simile funzionamento anche per l'applicativo di galleria.

Nelle sperimentazioni di positioning sono state provate diverse impostazioni, in particolare quelle a favore della velocità di aggiornamento, ma l'utilizzo di Beacon per applicazioni generiche e l'applicativo di navigazione dimostrativo (§ 5.1.1), se pur ambedue con ottime caratteristiche prestazionali, non hanno consentito di valutare il comportamento in campo con impostazioni particolarmente spinte. Tenendo però conto delle esigenze di accuratezza non elevate e della necessità di un positioning più indirizzato alla prossimità che alla multilaterazione senza soluzioni di continuità, si ritiene possibile prevedere sufficienti margini di miglioramento, in particolare a livello dell'applicativo di navigazione. Inoltre occorre evidenziare che la potenza di calcolo dei nuovi smartphone risulta essere sempre più elevata e questo contribuirà a ridurre il tempo di elaborazione dei dati. In ogni caso questi aspetti dovranno essere approfonditi e verificati attraverso ulteriori studi e sperimentazioni.

Nei prossimi due paragrafi saranno invece individuate soluzioni e accorgimenti contro le condizioni di propagazione *NLOS* e, in generale, a favore dell'incremento dell'affidabilità del positioning, nonché della semplificazione delle planimetrie di navigazione.

5.4.1 Posizione dei Beacon e limitazione della superficie di localizzazione

Come si è più volte evidenziato, l'utilizzo indoor dell'indicatore RSSI, in particolare alla frequenza di 2.4 GHz, richiede quantomeno di realizzare condizioni di propagazione in linea ottica (*LOS*), ovvero trasmissioni senza ostacoli tra il trasmettitore e il ricevitore. Per essere maggiormente precisi le situazioni più critiche sono chiaramente quelle affette da variabilità incontrollate delle condizioni di propagazione (da *LOS* a *NLOS* e viceversa). Durante i test RSSI (§ 5.3.2) sono state affrontate anche le difficoltà di ottenere una propagazione ottica sull'intera superficie stradale. In particolare con la figura 5.37 è stata realizzata una rappresentazione geometrica delle tipiche condizioni *LOS* e *NLOS* di galleria, in relazione alla posizione dei Beacon, delle persone e dei veicoli, leggeri e pesanti. A seguito di tali considerazioni, nonché dei risultati sperimentali, sono state individuate alcune posizioni ottimali per l'installazione dei dispositivi BLE, inoltre è stata individuata la possibilità di focalizzare la copertura radio lungo le pareti di galleria, in pratica di garantire il servizio di localizzazione solo

lungo le banchine. La garanzia del servizio solo a tali corridoi, oltre ad indirizzare gli utenti lungo un percorso di esodo idoneo e generalmente dotato di illuminazione di sicurezza, consentirebbe di evitare le notevoli interferenze (indotte dai veicoli) che si avrebbero operando sull'intera superficie stradale. In pratica si avrebbe una notevole semplificazione dell'area di copertura con un conseguente irrobustimento dell'affidabilità della localizzazione. Occorre però precisare che la presenza di veicoli lungo la galleria rappresenta comunque una fonte di interferenze, ad esempio per l'aumento dei fenomeni di riflessione, in particolare quando sono presenti veicoli pesanti. Questi aspetti andranno quindi approfonditi e valutati con ulteriori sperimentazioni sul campo, ma a livello preliminare si ritiene possibile attenuare tali disturbi lungo i corridoi laterali con l'utilizzo di antenne direttive, ottimizzate per la specifica area di radio copertura.

Risulta ovvio che l'utilizzo di questa strategia funzionale deve prevedere un'adeguata informazione dell'utenza di galleria, sia al momento dell'installazione dell'applicativo sullo smartphone, sia attraverso gli opportuni canali informativi, compreso la segnaletica stradale (un esempio in figura 5.56).



Figura 5.56: esempio di segnaletica di una galleria stradale dotata di sistema di localizzazione a livello delle banchine

In pratica l'utente dovrà semplicemente essere a conoscenza che per utilizzare correttamente il servizio di localizzazione occorre portarsi su uno dei lati della galleria. Si ritiene che tale limitazione non comprometta l'utilità del servizio e non rappresenti una particolare difficoltà di comprensione procedurale da parte dell'utente. D'altronde le persone sono abituate a dover assumere comportamenti particolari in condizione di

emergenza, ad esempio negli edifici sono ormai note le richieste comportamentali in caso d'incendio: raggiungere un luogo sicuro, vietato prendere l'ascensore, ecc.

Ciò non toglie che resta sempre possibile tentare di fornire un servizio accettabile sull'intera superficie stradale, ma in questo caso si ritiene necessario installare i Beacon, non solo lateralmente, ma anche sulla sommità della volta, come è stato riportato precedentemente in figura 5.37. Inutile dire che tale installazione, oltre ad aumentare i costi, rappresenta una posizione critica, in particolare per la vulnerabilità dei dispositivi in caso d'incendio.

In definitiva, in base ai risultati della sperimentazione, si ritiene opportuno installare i Beacon su ambo i lati di galleria, con un servizio di localizzazione ottimizzato e garantito solo lungo le banchine laterali. Si ritiene inoltre necessario contenere la distanza (lungo la parete) tra un Beacon e l'altro. A tal proposito, tenendo conto dei costi estremamente bassi dei dispositivi BLE, si ritiene opportuno ed economicamente sostenibile un'installazione con distanza tra i Beacon di circa 5 m, al fine di incrementare l'accuratezza e la robustezza della localizzazione, soprattutto prevedendo l'utilizzo di tecniche di positioning basate sulla prossimità o sul segnale più forte ricevuto. In merito invece all'altezza di installazione si ritiene necessario soffermarsi su alcuni aspetti che meritano ulteriori approfondimenti. In pratica durante la sperimentazione in galleria l'altezza di 3.5 m da terra è quella che ha restituito il miglior compromesso di funzionamento, ma si ritiene interessante valutare, con sperimentazioni future, un'installazione dei Beacon a circa 4 m, attraverso l'ottimizzazione delle antenne e/o aumenti della potenza di trasmissione. Tale altezza consentirebbe di ridurre ulteriormente i fenomeni di propagazione *NLOS*, ma resta inteso che la posizione ottimale di installazione deve essere individuata anche in relazione alla geometria e alle dimensioni della galleria, in quanto elementi necessari per valutare gli aspetti legati alla vulnerabilità dei dispositivi nei confronti dell'incendio e dei possibili urti da parte di mezzi pesanti.

In figura 5.57 si riporta una semplice rappresentazione grafica di quanto descritto in questo paragrafo (posizionamento dei dispositivi secondo i risultati sperimentali e area di radio copertura garantita solo lungo le banchine).

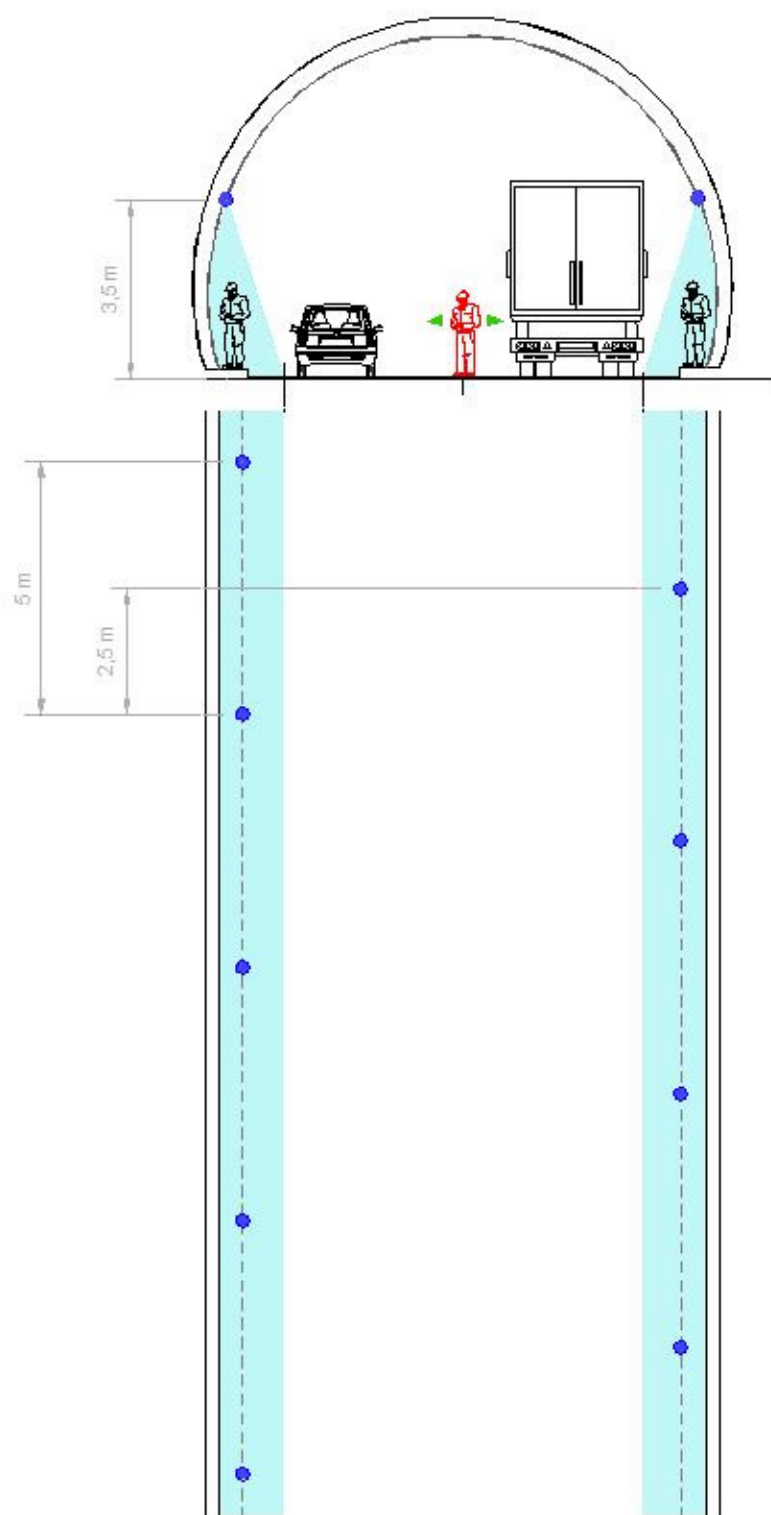


Figura 5.57: ottimizzazione della posizione dei Beacon con IPS garantito lungo le banchine di galleria

In relazione alla figura 5.57, si precisa che l'area di copertura radio, evidenziata lungo le banchine di galleria, è solo una rappresentazione grafica utile a fornire un'immediata

comprensione visiva delle zone dove è garantito il funzionamento del servizio di localizzazione, ma in realtà il segnale radio sarà presente su gran parte delle superficie stradale. Pertanto si avrà un certo livello di funzionamento anche al centro della carreggiata, compatibilmente con la presenza di ostacoli veicolari. Quest'ultimo aspetto di funzionamento rende opportuno installare i dispositivi di una parete in modo sfalsato rispetto alla parete opposta, come rappresentato appunto in figura 5.57. Lo sfasamento risulta inoltre molto vantaggioso applicando la linearizzazione della planimetria di navigazione, come verrà illustrato nel prossimo paragrafo.

Ritornando invece per un attimo alle antenne trasmettenti, proprio in virtù dell'area di copertura focalizzata sui corridoi laterali, si ritiene opportuno, e non particolarmente impegnativo, dotare i dispositivi BLE di elementi radianti appositamente studiati per una trasmissione radio ottimizzata per tali zone di funzionamento. L'aumento delle prestazioni radio consentirà di ottenere maggiore elasticità per l'individuazione della posizione ottimale dei dispositivi in relazione anche alle caratteristiche di galleria (geometria della sezione, dimensioni, tipologia di traffico consentito o prevalente, ecc.); in tal caso si potrebbe rivalutare il comportamento ad un'altezza intorno ai 4 m, in modo da ridurre ulteriormente i problemi di propagazione *NLOS* dovuti alle persone. A tali altezze si ritiene interessante rivalutare anche un modesto aumento della distanza tra i Beacon.

5.4.2 Aspetti di vulnerabilità e manutenibilità del sistema

La posizione dei Beacon in galleria risulta certamente fondamentale per garantire un adeguato funzionamento del sistema di localizzazione. L'affidabilità funzionale, legata alla posizione dei dispositivi, non si limita però solo alla propagazione dei segnali radio, ma coinvolge anche aspetti legati alla disponibilità di funzionamento in relazione alla vulnerabilità dei Beacon e delle condutture di cablaggio (alimentazione e controllo), ove utilizzate. A tal proposito i principali aspetti da considerare sono:

- vulnerabilità nei confronti dell'incendio;
- vulnerabilità nei confronti degli urti;
- vulnerabilità fisica nei confronti di atti vandalici e manomissioni;
- vulnerabilità nei confronti delle condizioni ambientali generali.

Sono inoltre da considerare gli aspetti legati alle difficoltà di manutenzione e alla vulnerabilità informatica, quest'ultima indipendente dalla posizione d'installazione.

In merito agli aspetti di vulnerabilità fisica, occorre sottolineare che l'indipendenza funzionale dei Beacon (in condizioni di alimentazione interna autonoma o di backup) consente di mantenere un soddisfacente livello di funzionamento del sistema anche in caso di perdita di alcuni dispositivi BLE o delle condutture di alimentazione e controllo. In pratica il sacrificio di alcuni Beacon nella zona dell'incidente, oppure la perdita del cablaggio, ad esempio a seguito di un incendio, non compromettono del tutto il funzionamento del sistema nelle restanti zone di galleria, nelle quali sarà comunque garantito il funzionamento relativo ai livelli di prestazione 0 e I che vedremo nei prossimi paragrafi. Ciò nonostante, l'installazione in sommità di galleria, viste le elevate temperature presenti in caso di incendio (§ 1.3.4 figura 1.10), esporrebbe il sistema a danni ingenti, condizione che si vorrebbe naturalmente evitare. A tal proposito si ritiene che l'installazione dei dispositivi BLE nella posizione riportata in figura 5.57, oltre ad offrire i vantaggi individuati in termini di propagazione radio, fornisce un soddisfacente compromesso in merito agli aspetti di vulnerabilità. Infatti la posizione può ritenersi accettabile sia nei confronti dell'incendio che in merito a gran parte dei possibili urti veicolari²⁸. Inoltre tale altezza risulta non troppo impegnativa per gli interventi di manutenzione e allo stesso tempo i dispositivi si trovano fuori portata fisica dalla stragrande maggioranza di eventuali atti vandalici e manomissioni.

Per quanto riguarda invece le condutture di cablaggio, in particolare al riguardo delle linee dorsali, si prevede, come vedremo, una realizzazione in grado di garantire una idonea resistenza funzionale alle condizioni termiche che si possono realizzare in caso di incendio. Adeguate caratteristiche di resistenza al fuoco sono raggiungibili attraverso l'utilizzo di appositi cavi e accessori, oppure attraverso opportuni metodi di posa. Si ricorda inoltre l'importanza delle note zone termiche di galleria in caso di incendio, le quali andranno considerate attentamente nell'ambito della scelta delle condutture e delle altezze di installazione. A tal proposito risulta ovvio che, a parità di caratteristiche della conduttura, una dorsale in galleria risulta meno esposta all'incendio se viene installata

²⁸ Al riguardo degli urti veicolari un'altezza da terra di 3.5 m garantisce la protezione dall'impatto di autovetture e di una buona parte di furgoni e veicoli simili, ma la posizione rimane ancora vulnerabile nei confronti dei mezzi pesanti di elevata altezza, per i quali occorrerebbe valutare un posizionamento ancora più elevato, ad esempio a 4.5 m (§ 5.4.1).

ad altezze ridotte (Zona ad Esposizione Bassa - ZEB) o, ancor meglio, con posa protetta (Zona ad Esposizione Protetta o interrata - ZEP), così come descritto e illustrato anche nella norma CEI 64-20 (§ 1.2.4, figura 1.10).

Nella realizzazione delle condutture, in particolare delle dorsali, si dovrà naturalmente tenere conto anche degli aspetti di vulnerabilità nei confronti dei possibili urti veicolari, operando, anche in questo caso, le opportune scelte al riguardo delle caratteristiche della conduttura (resistenza meccanica, posa protetta, ecc.) e delle altezze di installazione. Gli aspetti della protezione delle condutture dalle condizioni ambientali ordinarie e particolari sono comunque noti e ampiamente trattati da normative e linee guida [B1][B4][B9], pertanto si rimanda a tali documenti per ogni ulteriore approfondimento.

Occorre precisare che sono possibili soluzioni alternative all'installazione di cablaggi per l'alimentazione e il controllo dei Beacon, come quelle attuabili con l'utilizzo esclusivo di batterie interne ai dispositivi e con la realizzazione di una rete di controllo wireless realizzata con appositi Gateway BLE distribuiti lungo la galleria (ad esempio ogni 50-100 m). Sono soluzioni che meritano certamente di essere valutate, ma in questo elaborato, per ragioni di affidabilità e per fornire uno sviluppo più completo del progetto, si ritiene opportuno prevedere e trattare la realizzazione di un sistema cablato, sia per l'alimentazione che per il controllo dei Beacon. A tal proposito gli aspetti relativi al cablaggio saranno ripresi e approfonditi nei prossimi paragrafi, inoltre sarà affrontato lo sviluppo di un innovativo sistema per l'alimentazione di backup dei dispositivi, basato su componenti supercapacitori, i quali consentiranno di evitare l'utilizzo di batterie e classici accumulatori elettrochimici, favorendo sia gli aspetti di sostenibilità ambientale che quelli legati alla manutenzione.

Nell'installazione dei Beacon in galleria occorre naturalmente tener conto anche della protezione dei dispositivi dalle tipiche condizioni ambientali, ovvero dalla presenza di:

- infiltrazioni di acqua;
- polveri;
- fumi e sostanze corrosive in genere;
- vibrazioni e spostamenti d'aria.

In generale la protezione dagli agenti sopra elencati non rappresenta un problema, in quanto un adeguato fissaggio e l'utilizzo di un involucro in materiale radio-trasparente con un adeguato grado di protezione (IP) consente di far fronte alle condizioni ambientali. A tal proposito si ricorda che anche nella nostra sperimentazione di galleria sono stati utilizzati Beacon con grado di protezione IP 65.

La possibilità di utilizzare dispositivi elettronici in galleria, in particolare se si tratta di trasmettitori di radio frequenza, è subordinata anche ad una serie di aspetti legati alla compatibilità elettromagnetica (EMC) e in generale all'emissione di onde elettromagnetiche. Pertanto, oltre al rispetto delle prescrizioni normative in materia [A1][A3][B11], si ritiene necessario effettuare approfondite prove in campo in moderne gallerie autostradali, onde scongiurare la presenza di interferenze verso i Beacon, o da questi verso le altre apparecchiature presenti in galleria.

La manutenzione del sistema proposto è un argomento importante che merita una trattazione specifica, nonché la stesura di un apposito piano di manutenzione preventiva e predittiva, secondo le indicazioni normative e dei produttori delle apparecchiature. In ogni caso, pur non disponendo di uno storico sulla propensione al guasto dei Beacon in galleria, si prevede un impegno manutentivo modesto, in linea con le esigenze tipiche dei moderni sistemi speciali misti, ovvero dei sistemi composti da dispositivi elettronici e da cablaggi elettrici di energia e segnale.

In merito invece al controllo e alla verifica di corretto funzionamento, si ritiene opportuno dividere tali attività in due possibili modalità esecutive: manuale e automatica informatizzata. La prima modalità non rappresenta un problema, in quanto il funzionamento complessivo è facilmente verificabile percorrendo la galleria e osservando direttamente il funzionamento del sistema dall'applicativo di navigazione, inoltre ogni singolo Beacon può essere verificato, interrogato e programmato a distanza da un operatore (in Bluetooth entro 20 m circa), attraverso gli applicativi che ogni produttore rilascia a tale scopo. La verifica automatica informatizzata o l'autodiagnosi continua può invece presentare qualche difficoltà in più, in quanto richiede la connessione in rete dei Beacon. A livello preliminare si possono prevedere due soluzioni:

1. dotare i dispositivi BLE di un'interfaccia in grado di consentire la connessione cablata in rete (es. RS485), al fine di poter monitorare i principali parametri di funzionamento. Tale soluzione non presenta particolari costi aggiuntivi, in quanto si prevede di utilizzare una rete dati cablata anche per assolvere al controllo dei singoli Beacon nelle funzioni avanzate di esodo, che vedremo nella descrizione del livello di prestazione II;
2. monitorare i segnali radio emessi dai Beacon, nonché i loro parametri di funzionamento, utilizzando un sistema wireless realizzato con appositi Gateway BLE (§ 5.1.1) distribuiti lungo la galleria.

Le due soluzioni non si escludono a vicenda, anzi si ritiene opportuno realizzarle entrambe per ottenere un sistema di controllo particolarmente completo e affidabile.

In ogni caso, per ovvie ragioni di sicurezza, si ritiene indispensabile sviluppare un adeguato sistema di autodiagnosi e segnalazione dello stato di funzionamento.

Sin qui si è parlato di vulnerabilità fisica, ma per completezza si ritiene doveroso evidenziare la necessità di garantire anche la sicurezza informatica dei dispositivi BLE, in pratica si ritiene indispensabile adottare adeguati sistemi per proteggere i Beacon da accessi indesiderati o da veri e propri cyber attack. In generale questi dispositivi BLE sono già dotati di una password per poter accedere alla modifica delle impostazioni di funzionamento. Ad esempio, il dispositivo BlueBeacon Forte da noi utilizzato dispone di diversi accorgimenti di sicurezza:

- accesso tramite password alfanumerica di 6 caratteri;
- possibilità da parte del gestore finale di modificare la password di default;
- cifratura della password durante la connessione;
- sistema antiforzatura, con blocco della funzione di accesso dopo 3 tentativi continui eseguiti senza uscire dall'applicativo di gestione (per riabilitare la funzione di accesso occorre togliere e ridare alimentazione al Beacon).

Si tratta di sistemi di protezione di tutto rispetto, utilizzati generalmente in molte apparecchiature elettroniche dotate di un controllo accesso, ma si ritiene opportuno, vista l'applicazione di galleria, dotare i Beacon di ulteriori livelli di sicurezza, come ad

esempio quello di consentire l'accesso alla programmazione solo tramite dispositivi dedicati, preventivamente e opportunamente registrati nel sistema.

5.4.3 Linearizzazione e orientamento della planimetria di navigazione

A questo punto, prima di affrontare lo sviluppo di funzioni dedicate al supporto dell'esodo, si ritiene opportuno tornare brevemente sulla planimetria di navigazione, al fine di migliorare sia gli aspetti legati al positioning che quelli relativi alla comprensione delle informazioni da parte dell'utente di galleria. Si premette che si tratta di aspetti ai limiti delle finalità previste dal presente progetto, pertanto saranno fornite indicazioni di massima, ritenute utili per studi e sviluppi futuri.

Durante la sperimentazione nella galleria di Framura, in particolare analizzando il comportamento altalenante descritto nella precedente figura 5.53, si è avuta l'intuizione di evitare l'utilizzo di una planimetria di navigazione realistica, a favore di una rappresentazione grafica linearizzata della galleria stradale. In pratica, tenendo conto che l'utilità principale per l'utente di galleria è conoscere la sua posizione longitudinale e non quella trasversale, si è pensato di ridurre la planimetria a qualcosa di molto simile ad una linea di navigazione. Così facendo si prevede di ottenere diversi vantaggi:

- sfruttamento di tutti i segnali BLE per l'ottenimento di un positioning rappresentato graficamente solo lungo la lunghezza della galleria, privo quindi di spostamenti trasversali che, come si è visto, risultano spesso affetti da errori di propagazione del segnale;
- positioning svincolato dalla posizione trasversale eventualmente assunta in galleria dall'utente, quindi compatibilità e miglior gestione della strategia relativa alla copertura radio focalizzata lungo le banchine (§ 5.4.2)
- migliore e più semplice gestione, da parte dell'applicativo di navigazione, della planimetria, del suo orientamento e delle informazioni di esodo, sia in termini grafici che in merito all'impegno computazionale e di memorizzazione dei dati;
- comprensione più immediata da parte dell'utente in merito alla sua posizione lungo la galleria e in generale al riguardo delle informazioni di supporto all'esodo.

In figura 5.58 si riporta un esempio di una planimetria linearizzata.

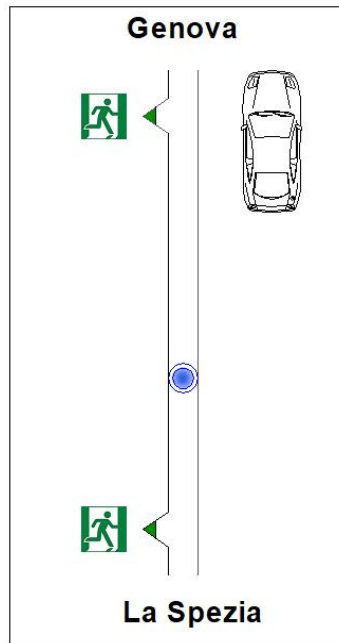


Figura 5.58: esempio di planimetria linearizzata per la navigazione pedonale in una galleria ad unico senso di marcia

L'immagine di figura 5.58 può già rappresentare un primo semplice esempio dell'interfaccia grafica di un futuro applicativo di navigazione, nel caso di una galleria ad unico senso di marcia. Lo sviluppo di tale interfaccia rappresenta certamente un compito impegnativo, per il quale si ritiene necessario adottare un approccio multidisciplinare in ulteriori studi e approfondimenti futuri. Sarà infatti necessario considerare sia aspetti tecnici sia quelli legati alla comprensione umana di informazioni fornite in condizioni di emergenza. Nel seguito del presente elaborato saranno comunque riportate indicazioni, considerazioni ed esempi grafici, questi ultimi utilizzati anche per descrivere più chiaramente le diverse funzioni informative del sistema di localizzazione.

In generale, in diversi ambiti, sono ben note le difficoltà legate alla corretta e immediata comprensione di mappe e planimetrie, in particolare se si è chiamati ad osservarle in condizioni di emergenza. Al riguardo del percorso da seguire le difficoltà maggiori si hanno quando l'orientamento della planimetria non è coerente con il punto di vista dell'osservatore. In tali condizioni le elaborazioni mentali richieste per la comprensione delle informazioni conducono generalmente a ritardi ed errori di apprendimento. Queste condizioni si verificano generalmente con planimetrie statiche non orientate e non orientabili, come accade spesso con quelle per l'esodo di emergenza poste negli edifici,

ma nulla toglie che si possano realizzare condizioni simili anche con raffigurazioni grafiche digitali riportate su un display, come appunto quello di uno smartphone.

A tal proposito, la semplice geometria di galleria sembra apparentemente facilitare l'indicazione delle informazioni di esodo, in realtà l'assenza di frequenti riferimenti geometrici rende critica la comprensione del verso da seguire, in particolare in condizioni di scarsa visibilità. Si ritiene quindi necessario dotare il sistema di accorgimenti atti a facilitare la comprensione delle informazioni e a segnalare la percorrenza del verso errato. In pratica si dovranno utilizzare alcune delle modalità di visualizzazione utilizzate dai classici applicativi per la navigazione e l'orientamento in esterno; a livello preliminare si prevede di valutare l'utilizzo contemporaneo dei seguenti 5 accorgimenti:

1. orientamento a nord della planimetria di navigazione, indipendentemente dall'orientamento dello smartphone;
2. zoom automatico della planimetria in base ai dettagli utili da visualizzare (uscite di emergenza, colonnine SOS, sbocchi, ecc.);
3. indicazione grafica del verso di percorrenza veicolare (solo per le gallerie a senso unico di marcia);
4. informazione del verso di percorrenza attraverso l'indicazione di località geografiche note;
5. segnalazione di errore in caso di spostamento lungo il verso sbagliato o sconsigliato.

Gli accorgimenti 1 e 2 non rappresentano un problema dal punto di vista tecnico, in quanto si tratta di semplici modalità di visualizzazione oggi disponibili in diversi applicativi di navigazione. In particolare il mantenimento di un orientamento grafico coerente con l'ambiente (indipendentemente dall'orientamento dello smartphone), quindi la continua coincidenza del nord riportato in pianta con quello effettivo di galleria, consente all'osservatore una facile comprensione dei propri spostamenti e delle informazioni di navigazione (direzione e verso). Questa tipologia di visualizzazione, attuabile anche sui tre assi, sfrutta la moderna sensoristica oggi presente nella maggior parte degli smartphone. Le migliori prestazioni si ottengono con tecniche di orientamento in grado di utilizzare oltre ai sensori magnetici anche l'accelerometro e il

giroscopio. Si è avuto modo di provare una visualizzazione simile anche nella nostra sperimentazione di galleria (§ 5.3.3), grazie alla funzione di orientamento automatico a nord offerta dall'applicativo BlueBeacon Navigator Demo [F3][F7]. In figura 5.59 si riportano due screenshot dell'applicativo con tale modalità di visualizzazione attivata.

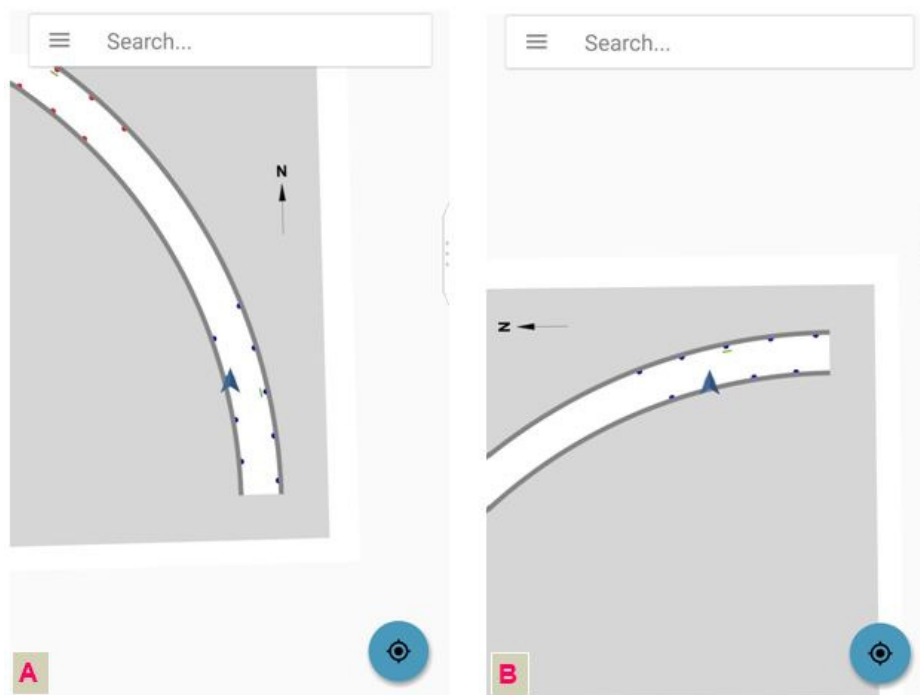


Figura 5.59: applicativo di navigazione con funzione di orientamento automatico a nord attivato, screenshot effettuati durante la sperimentazione nella galleria di Framura (SP)

Come si può osservare dalle immagini, comunque venga ruotato lo smartphone, la planimetria rimane orientata in direzione del nord, in coerenza con l'ambiente e quindi con il punto di vista dell'osservatore. Purtroppo però non è tutto oro quel che luccica, in quanto sono presenti diverse criticità di funzionamento, tra cui principalmente la perturbazione del campo magnetico terrestre dovuto a interferenze elettromagnetiche e alla presenza in galleria di masse metalliche (ad esempio quelle dei veicoli), le quali possono causare errori di orientamento più o meno significativi, come è stato rilevato anche durante alcune fasi della nostra sperimentazione. Si ritiene pertanto opportuno approfondire ulteriormente questi aspetti, valutando la possibilità di sfruttare soluzioni più avanzate, basate ad esempio sull'uso contemporaneo di più sensori, oppure su soluzioni orientate all'utilizzo del nord geografico anziché magnetico, quindi con uno

sfruttamento della sensoristica dello smartphone più orientato a funzionalità di girobussola.

Il semplice accorgimento 3, ovvero riportare sul navigatore un'indicazione grafica del verso di percorrenza veicolare, risulta utile per rafforzare la comprensione del verso da seguire per raggiungere l'uscita individuata. Tale indicazione grafica potrebbe essere realizzata con un veicolo stilizzato, come rappresentato in figura 5.58. Naturalmente tale indicazione dovrà essere presente solo nelle gallerie a senso unico di marcia, pertanto in caso di doppio senso (anche provvisorio a seguito di lavori stradali) si dovranno individuare accorgimenti tecnici per eliminare tale indicazione (ad esempio attraverso i dati trasmessi dai Beacon).

Anche l'accorgimento 4 è di semplice implementazione; sempre per agevolare la comprensione del giusto verso da seguire, si ritiene opportuno riportare l'indicazione delle principali località che precedono e seguono ogni specifica galleria (figura 5.58).

Infine l'accorgimento 5 è relativo ad informare l'utente, con un segnale di allarme, in caso di percorrenza della galleria nel verso sbagliato. A livello dell'interfaccia la funzione non rappresenta certo un problema, in quanto è possibile individuare molteplici sistemi visivi, sonori e tattili (vibrazione dello smartphone) per attuare la segnalazione, mentre la complessità risiede nella difficoltà da parte del sistema di individuare quando l'utente si sposta nel verso sbagliato. Questa funzione sarà introdotta e descritta nel paragrafo 5.4.5, relativo al livello di prestazione I.

5.4.4 Funzionamento di base: livello di prestazione 0

La funzione primaria del sistema di localizzazione è quella di fornire supporto all'utente di galleria durante l'esodo di emergenza, ma anche in ogni altra situazione legata allo spostamento a piedi lungo l'infrastruttura stradale. L'utente infatti può dover abbandonare la galleria per un'emergenza dovuta alle condizioni ambientali (incendio, sversamento di sostanze pericolose, ecc.), ma, nei limiti consentiti dal codice della strada, può trovarsi anche a dover percorrere l'infrastruttura per emergenze personali, ad esempio per raggiungere una colonnina di SOS. La possibilità di disporre di un

applicativo, in grado di fornire informazioni sulla propria posizione e su quella di uscite e presidi di sicurezza, contribuisce certamente a ridurre il rischio di galleria e nello stesso tempo rappresenta per l'utente una tranquillità psicologica.

Un funzionamento di base, simile a quello realizzato nella sperimentazione di Framura, definito in questa ricerca come livello di prestazione 0, può già fornire un utile supporto decisionale sul percorso da seguire. Realizzando infatti un'opportuna interfaccia di navigazione è possibile fornire all'utente semplici ma comprensibili indicazioni sulla posizione dell'uscita a lui più vicina. In pratica è necessario che l'interfaccia grafica visualizzi chiaramente sia la posizione del soggetto sia quella delle uscite situate prima e dopo il soggetto stesso, in modo da consentire una stima grafica, se pur relativa, del percorso più breve. Questo tipo di funzionamento richiede funzionalità di ridimensionamento automatico dell'inquadratura, in modo da visualizzare simultaneamente le uscite o i punti di interesse più vicini al soggetto. Con questo livello funzionale, vista l'assenza di altre indicazioni, la comprensione delle distanze in gioco può ritenersi possibile solo con un'osservazione dall'alto dei percorsi di galleria, pertanto non sono possibili punti di vista particolari con orientamenti sui tre assi, come consentito con alcuni navigatori stradali.

La figura 5.60 riporta un esempio di quanto sin qui descritto; l'immagine A rappresenta una condizione schematizzata di galleria con il soggetto da localizzare, mentre l'immagine B rappresenta il soggetto localizzato attraverso un esempio d'interfaccia di navigazione che utilizza una planimetria di galleria linearizzata. Come si può osservare la posizione del soggetto viene visualizzata su uno stretto righello che riproduce solo gli spostamenti longitudinali. Questo accorgimento, come si è detto, consente di migliorare sia gli aspetti di positioning che quelli di gestione grafica delle immagini, inoltre semplifica la comprensione delle informazioni.

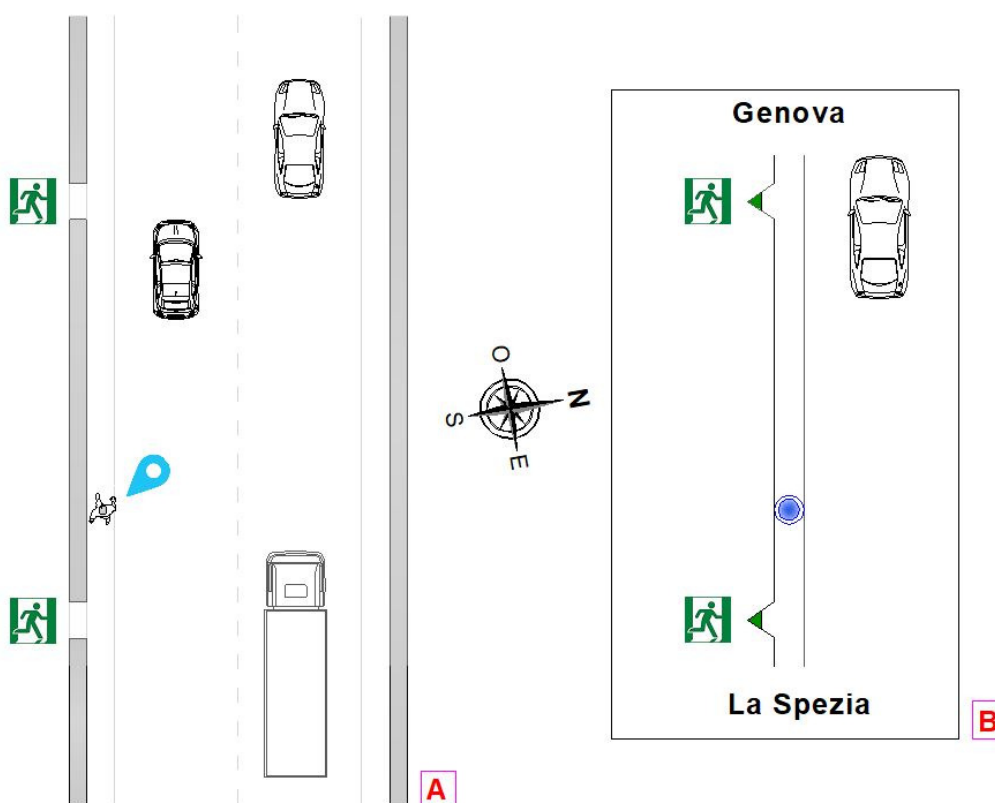


Figura 5.60: IPS di galleria, esempio funzionamento di base: livello di prestazione 0

Le informazioni fornite da questo livello prestazionale, se pur di una certa utilità, sono modeste e meritano di essere ampliate con funzioni specifiche ottimizzate per l'ambiente di galleria. Occorre però sottolineare che tale funzionamento si può ottenere senza particolari accorgimenti in merito al pacchetto dati trasmesso dai Beacon, inoltre non è richiesta la programmazione in real time dei dispositivi BLE, indispensabile invece nel livello di prestazione II.

Con un funzionamento di questo tipo, optando per un'alimentazione autonoma dei Beacon (ad esempio con le classiche batterie al litio), è possibile anche evitare la realizzazione delle condutture di alimentazione e controllo. Occorre però precisare che senza una connessione in rete dei dispositivi BLE, sia essa cablata o wireless, risulta difficile realizzare un valido sistema di autodiagnosi dei parametri di funzionamento.

Prima di fornire le indicazioni di programmazione dei dispositivi, in relazione al livello di prestazione, si ritiene opportuno fare una breve premessa. Nel caso il cui il presente progetto giunga al trasferimento tecnologico per essere sfruttato in galleria, si potranno realizzare dispositivi BLE ottimizzati, sia sotto il profilo hardware che software, per

l'applicazione specifica; pertanto è prevedibile lo sviluppo di un firmware in grado di gestire un pacchetto dati personalizzato. Ciò nonostante, al fine di consentire un immediato utilizzo della ricerca, ad esempio per la realizzazione di ulteriori sperimentazioni, si ritiene corretto individuare soluzioni di programmazione con l'uso del noto formato iBeacon (§ 4.4.1).

Come si è detto, per il funzionamento di base, non si prevedono particolari accorgimenti a livello dei dati identificativi dei Beacon, ma risulta ovvio che ogni singolo Beacon debba essere identificato in modo univoco.

Di seguito si riporta un possibile metodo di utilizzo dei parametri UUID, Major e Minor presenti nel formato iBeacon; tale soluzione tiene conto delle ulteriori funzioni previste nei prossimi livelli prestazionali. Si precisa inoltre che è possibile individuare altre soluzioni, naturalmente nei limiti del modesto numero di byte disponibili.

- UUID (16 byte disponibili): attraverso questo parametro è possibile identificare l'applicazione IPS di galleria e trovare spazio anche per l'identificazione univoca della specifica galleria;
- Major Number (2 byte disponibili): questo parametro può essere utilizzato per identificare il singolo Beacon all'interno della specifica galleria;
- Minor Number (2 byte disponibili): questo parametro, non utilizzato nel livello di prestazione 0, è reso disponibile per attuare i livelli prestazionali successivi.

5.4.5 Funzionamento in condizioni ordinarie: livello di prestazione I

Avendo già introdotto l'argomento nel paragrafo precedente, si riportano in figura 5.61 le immagini descrittive del livello di prestazione I.

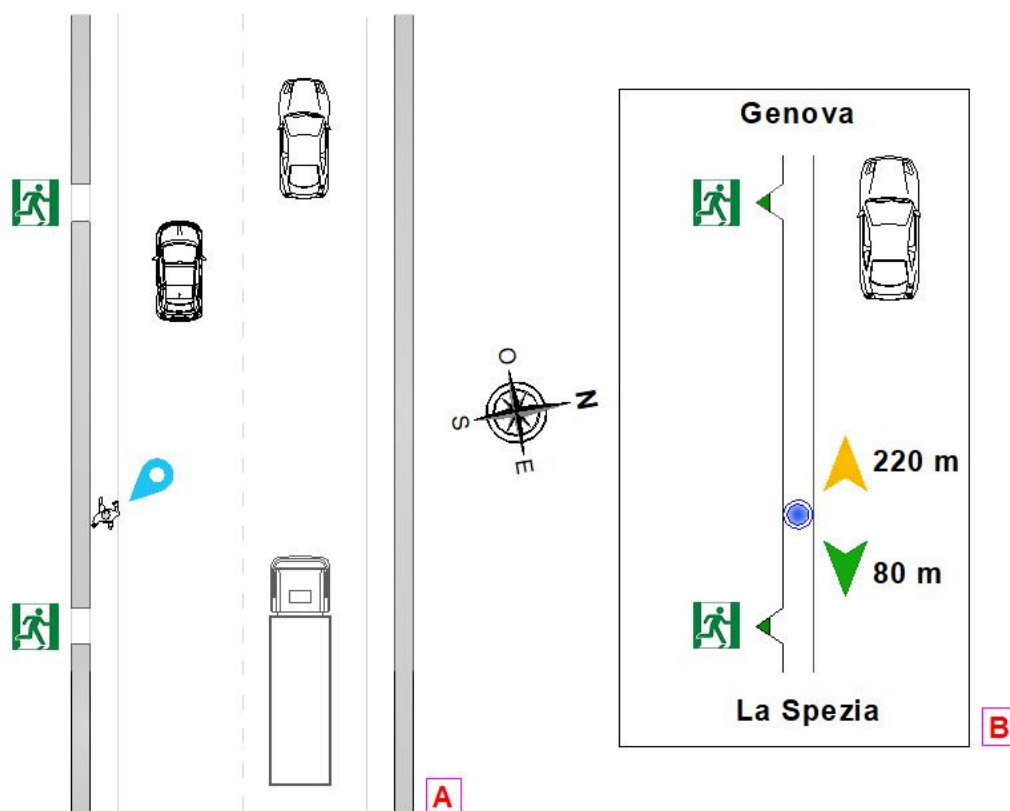


Figura 5.61: IPS di galleria, esempio di funzionamento in condizioni ordinarie: livello di prestazione I

Con il livello di prestazione I, oltre alle informazioni grafiche previste nel livello 0, si desidera fornire all'utente la distanza in metri dalle uscite o dai presidi di sicurezza più vicini alla sua posizione in galleria. L'interfaccia, inoltre, può essere arricchita e rafforzata da indicazioni di verso opportunamente colorate; ad esempio in figura 5.61 la freccia nel verso dell'uscita più vicina (80 m) è stata rappresentata con il colore verde, mentre quella relativa all'uscita più lontana (220 m) è stata colorata di giallo, ad indicare che tale scelta è sconsigliata, ma comunque non particolarmente rischiosa. E' possibile valutare anche l'opportunità di fornire una stima dei tempi di percorrenza a piedi per raggiungere le uscite.

Tale modalità di funzionamento risulta particolarmente idonea ad operare in condizioni ordinarie di galleria, ovvero quando l'individuazione del percorso ottimale dipende solo dalle distanze in gioco. Mentre in condizioni di emergenza, come vedremo, l'individuazione del percorso ottimale è certamente più complesso, sia sotto il profilo

tecnico che etico, in quanto occorre valutare il tragitto più sicuro, che non necessariamente è quello più corto.

Per attuare il funzionamento del presente livello prestazionale si individuano due possibili soluzioni:

1. ***lato ricevitore*** - le distanze in gioco vengono ricavate direttamente dall'applicativo di navigazione installato sullo smartphone, attraverso un opportuno utilizzo dei dati caricati in memoria e di quelli relativi al positioning del soggetto. In pratica, i dati di planimetria, oltre alle posizioni/coordinate dei Beacon, dovranno essere arricchiti con le posizioni in pianta delle uscite di emergenza e di ogni altro punto di interesse. Quando l'applicativo localizza il soggetto in un punto della planimetria può calcolare le distanze a partire da questo preciso punto, oppure più semplicemente dalla posizione del Beacon che ha fornito il segnale più forte, prevedendo che tale dispositivo BLE si trovi a pochi metri dal soggetto stesso. Le strategie tecniche e di calcolo più opportune andranno individuate in fase di sviluppo del software, in ogni caso si ritiene che ci siano dati più che sufficienti allo scopo, inoltre l'utilizzo previsto di planimetrie di navigazione linearizzate riduce notevolmente le difficoltà risolutive e l'impegno computazionale richiesto;
2. ***lato trasmettitore*** - sempre prevedendo che il segnale più forte (RSSI più elevato) sia relativo ad un Beacon molto vicino al soggetto, è possibile prevedere di memorizzare le distanze relative ad una coppia di uscite di emergenza (una prima e l'altra dopo il Beacon) direttamente nel pacchetto dati trasmesso dal Beacon stesso. Questo comporta che in fase d'installazione ogni singolo dispositivo BLE dovrà essere programmato con dati di distanza diversi a seconda della sua posizione lungo la galleria. Durante il funzionamento ogni Beacon trasmetterà il suo pacchetto dati, sarà poi compito dell'applicativo, installato sul ricevitore, visualizzare sulla grafica di navigazione solo le distanze trasmesse dal Beacon che ha fornito il segnale più forte. Per la memorizzazione dei valori di distanza all'interno del pacchetto di trasmissione del formato iBeacon, si potrebbe ad esempio sfruttare il Minor Number, ma

con solo 2 byte disponibili si avrebbero poi difficoltà nell'implementare le funzioni che vedremo nel livello di prestazione II.

La soluzione 1 è sicuramente quella da preferire, in quanto, oltre ad essere tecnicamente più valida, consente di evitare conflitti funzionali e difficoltà legate alla programmazione dei dispositivi BLE. La soluzione 2 può risultare invece utile a livello sperimentale quando si dispone di risorse limitate per lo sviluppo dell'applicativo di navigazione.

Considerando di utilizzare la soluzione 1, si possono programmare i parametri identificativi dei Beacon (UUID, Major e Minor) come individuato precedentemente per il funzionamento di base. Inoltre, anche in questo caso, risulta possibile evitare l'utilizzo del cablaggio di alimentazione e di programmazione in real time dei dispositivi BLE. A tal proposito si ricorda che l'assenza completa di cablaggi filari richiede l'uso di dispositivi dotati di una batteria interna, inoltre senza la presenza di una rete dati (cablata o wireless, ad esempio con Gateway BLE) risultano di difficile soluzione i problemi relativi all'autodiagnosi automatica dei parametri di funzionamento (§ 5.4.2).

Ritornando alle indicazioni sul percorso consigliato, quindi sul verso da seguire, è possibile prevedere (a livello dell'interfaccia di navigazione) anche un segnale ottico e acustico che avvisi l'utente nel caso percorra la galleria nel verso sbagliato. Con l'architettura prevista questa funzione può essere realizzata facilmente sfruttando l'identificativo di ogni Beacon; nel nostro caso il Major Number. Come si è visto, il funzionamento del sistema di localizzazione richiede che l'applicativo di navigazione disponga delle informazioni relative alla mappa di galleria e alla posizione di ogni singolo Beacon univocamente identificato. Quando l'utente si sposta lungo la galleria l'applicativo installato sullo smartphone raccoglie i segnali provenienti dai vari Beacon con valori di potenza più o meno proporzionali alle distanze in gioco. Prevedendo un'installazione lungo la galleria di Beacon identificati da un Major in ordine crescente (a partire da un determinato riferimento) l'applicativo sarà in grado di comprendere il verso di spostamento dell'utente e quindi di attivare un segnale di allarme dopo una certa distanza (numero di Beacon) percorsa in senso sbagliato. Il riferimento da cui far partire la numerazione dei Major è sicuramente uno dei due imbocchi di galleria, resta

da decidere quale. Al fine di uniformare il metodo, si potrebbe ad esempio far partire la numerazione dall'imbocco più vicino al nord geografico, mentre nel caso di parità (perfetto orientamento est-ovest) si farà riferimento all'imbocco est.

Si evidenzia però che le informazioni circa il verso consigliato e soprattutto la segnalazione all'utente di verso errato di percorrenza possono rappresentare un rischio se il sistema non è in grado di ricevere dati sulle condizioni di galleria, ovvero se non è in grado di raggiungere il livello di prestazione II, illustrato nel prossimo paragrafo. Infatti in caso di un'emergenza in galleria, ad esempio in presenza di un incendio, consigliare un verso solo in relazione alle distanze dalle uscite di emergenza potrebbe indirizzare gli utenti verso la fonte del pericolo. Pertanto, in assenza di un affidabile sistema di controllo delle effettive condizioni di galleria, si ritiene opportuno fornire all'utente solo informazioni neutre, ovvero sua posizione in galleria e distanza puntuale dalle uscite. Tali aspetti saranno ripresi in seguito con la descrizione del livello di prestazione II.

5.4.6 Funzionamento in condizioni di emergenza: livello di prestazione II

Anche in questo caso, prima di passare alla descrizione delle funzioni e alle soluzioni tecniche per poterle attuare, si riportano in figura 5.62 le condizioni di galleria (immagine A) e un esempio dell'interfaccia funzionante al livello di prestazione II (immagine B).

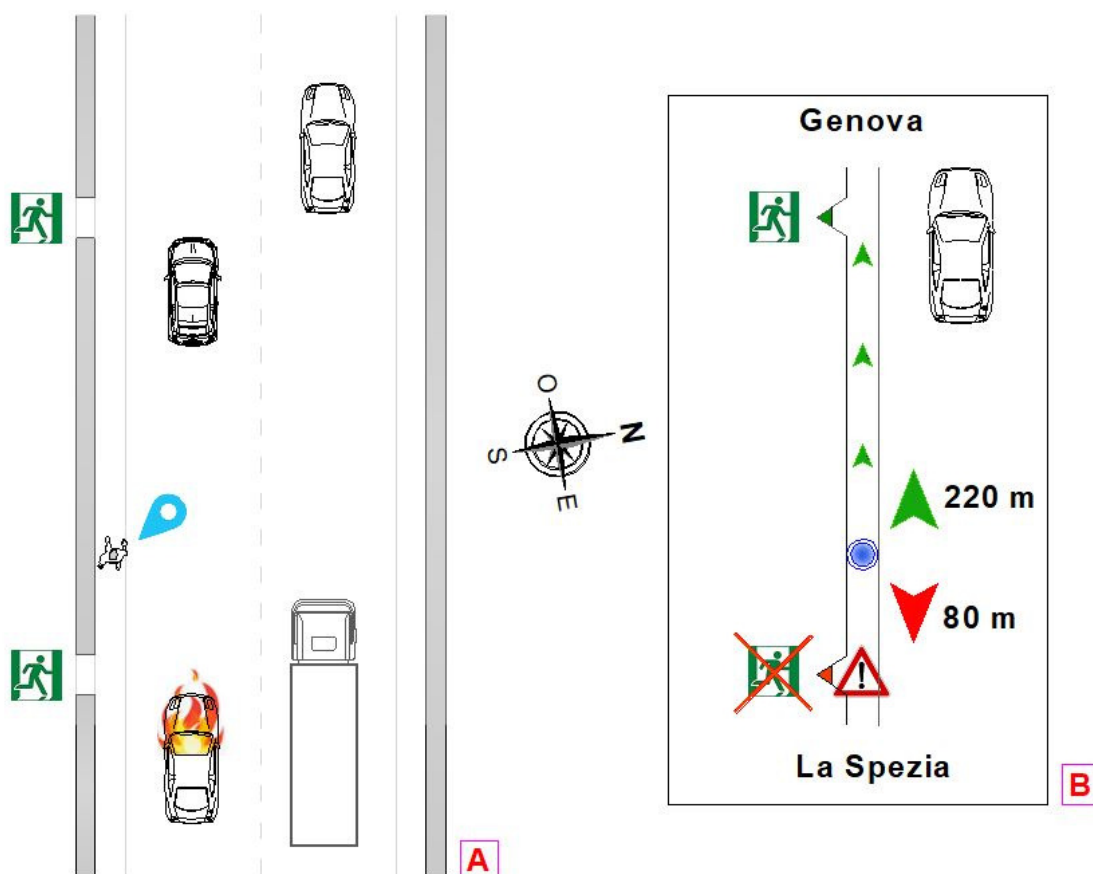


Figura 5.62: IPS di galleria, esempio di funzionamento in condizioni di emergenza: livello di prestazione II

Il funzionamento al livello di prestazione II è previsto per supportare l'utente quando la galleria si trova in condizioni di emergenza, ad esempio in caso di incendio. Il sistema in questa modalità di funzionamento non opera considerando solo le distanze dalle uscite, come abbiamo visto nel livello di prestazione I, ma fornisce indicazioni dinamiche sul percorso di esodo più sicuro, in relazione alla posizione dell'incidente, alle condizioni di galleria e alla posizione dell'utente. Come si può vedere nell'immagine B della figura 5.62, a seguito della presenza di un incendio in galleria, il sistema ha fornito all'utente un percorso più lungo ma più sicuro, mentre quello più breve è stato invece contrassegnato come pericoloso, in quanto interessato dalla presenza dell'incendio. Il sistema inoltre è stato in grado di fornire all'utente anche la posizione della fonte del pericolo presente in galleria.

Si tratta di funzioni complesse in relazione alla semplicità di funzionamento dei Beacon, i quali, come sappiamo, sono in grado di inviare periodicamente solo un piccolo

pacchetto di dati preventivamente impostato. Nel livello prestazionale I è stato ancora possibile evitare di dover fornire ai Beacon istruzioni in tempo reale per assolvere alle funzioni richieste, in questo caso invece occorre modificare i dispositivi BLE per renderli programmabili in real time. E' necessario infatti variare il pacchetto dati trasmesso da ciascun Beacon a seconda delle condizioni di galleria, in modo da poter fornire all'utente indicazioni aggiornate sull'incidente e sul miglior verso di esodo. Un funzionamento di questo tipo richiede la realizzazione di un sistema di programmazione dei dispositivi BLE opportunamente interfacciato con il sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) di galleria, in modo da poter sfruttare i dati rilevati dalla sensoristica di sicurezza (rilevatore lineare di temperatura, sensori di fumo, anemometro, telecamere, ecc.) per fornire la corretta programmazione ai Beacon. Utilizzando il formato iBeacon per definire il pacchetto dati trasmesso dai dispositivi BLE, si prevede di sfruttare il Major Number per identificare univocamente il Beacon in galleria, mentre il Minor Number sarà programmato di volta in volta in base alle indicazioni da fornire all'utente.

In figura 5.63 si riporta uno schema unifilare di esempio, dove è stato previsto l'utilizzo di Beacon particolari, dotati di un'apposita interfaccia in grado di consentire la programmazione dei parametri di interesse attraverso una rete dati cablata. L'applicazione dello schema richiede pertanto la realizzazione di dispositivi BLE con tali caratteristiche, inoltre si precisa che gli aspetti legati all'alimentazione dei Beacon saranno ripresi e approfonditi in successivi paragrafi.

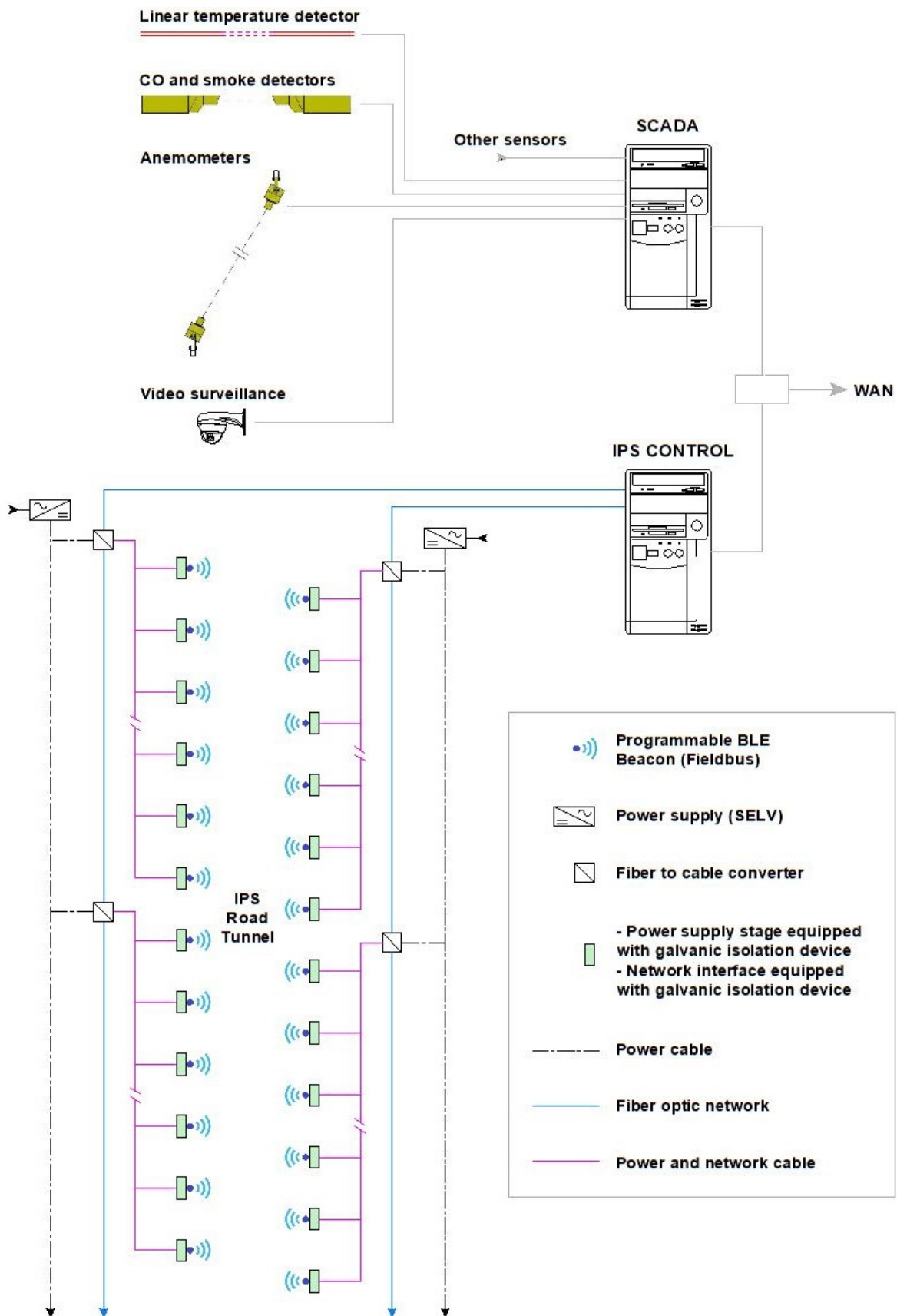


Figura 5.63: schema unifilare di principio dell'IPS di galleria, livello di prestazione II

Come si è detto precedentemente è possibile realizzare anche reti di controllo wireless, ad esempio attraverso una serie di Gateway BLE distribuiti lungo tutta la galleria, ma per ragioni di affidabilità, non introdurre criticità e fornire uno sviluppo progettuale più completo, si è ritenuto opportuno optare per una soluzione cablata. Ciò non toglie che in approfondimenti futuri possano tranquillamente essere prese in considerazione anche soluzioni alternative, la cui applicazione, a questo punto di sviluppo, non dovrebbe richiedere ingenti sforzi. La figura 5.63 è da ritenersi comunque uno schema di principio, in quanto la progettazione della rete di controllo è subordinata allo standard di comunicazione utilizzato. Tali aspetti non sono attualmente oggetto di sviluppo della presente ricerca, in ogni caso è prevedibile l'utilizzo di un sistema di comunicazione snello e affidabile da individuare, ad esempio, all'interno della famiglia dei noti bus di campo (EN 61158) utilizzati in ambito industriale [B22]. A seconda dello standard, del protocollo (es. RS485) e del supporto fisico (fibra ottica, cavo in rame, sistemi ibridi) si potrà definire senza particolari problemi l'architettura precisa della rete di comunicazione. Lo schema di esempio, in considerazione di aspetti generali legati alle distanze in gioco e al numero di Beacon collegabili a ciascuna dorsale di tratta (da individuarsi a seconda del bus utilizzato), riporta una soluzione ibrida; fibra per le dorsali principali e cavo per il cablaggio delle dorsali di tratta, nonché per le derivazioni verso ciascun Beacon.

La seguente figura 5.64 illustra un'architettura dimostrativa di programmazione real time dei Beacon nel caso di un incendio in galleria. Si precisa che nella rappresentazione, a titolo di esempio, al fine di semplificare la comprensione, è stata utilizzata una numerazione decimale, ma risulta ovvio che nello sviluppo degli applicativi software si farà uso di un formato binario, pertanto sarà possibile sfruttare completamente i due byte disponibili per programmare i parametri di interesse. Inoltre si evidenzia che si tratta di una raffigurazione semplificata, dove non si è tenuto conto delle complesse condizioni ambientali di galleria, come ad esempio quelle legate alla ventilazione naturale e artificiale e quindi al comportamento degli affluenti dell'incendio. Risulta ovvio che il solutore preposto all'elaborazione e assegnazione dei percorsi ottimali di esodo (quindi alla programmazione dei Beacon) dovrà tenere conto di ogni aspetto relativo alle condizioni ambientali lungo l'infrastruttura, attraverso le

informazioni ricevute dalla sensoristica del sistema SCADA e in accordo con il previsto piano di emergenza di galleria.

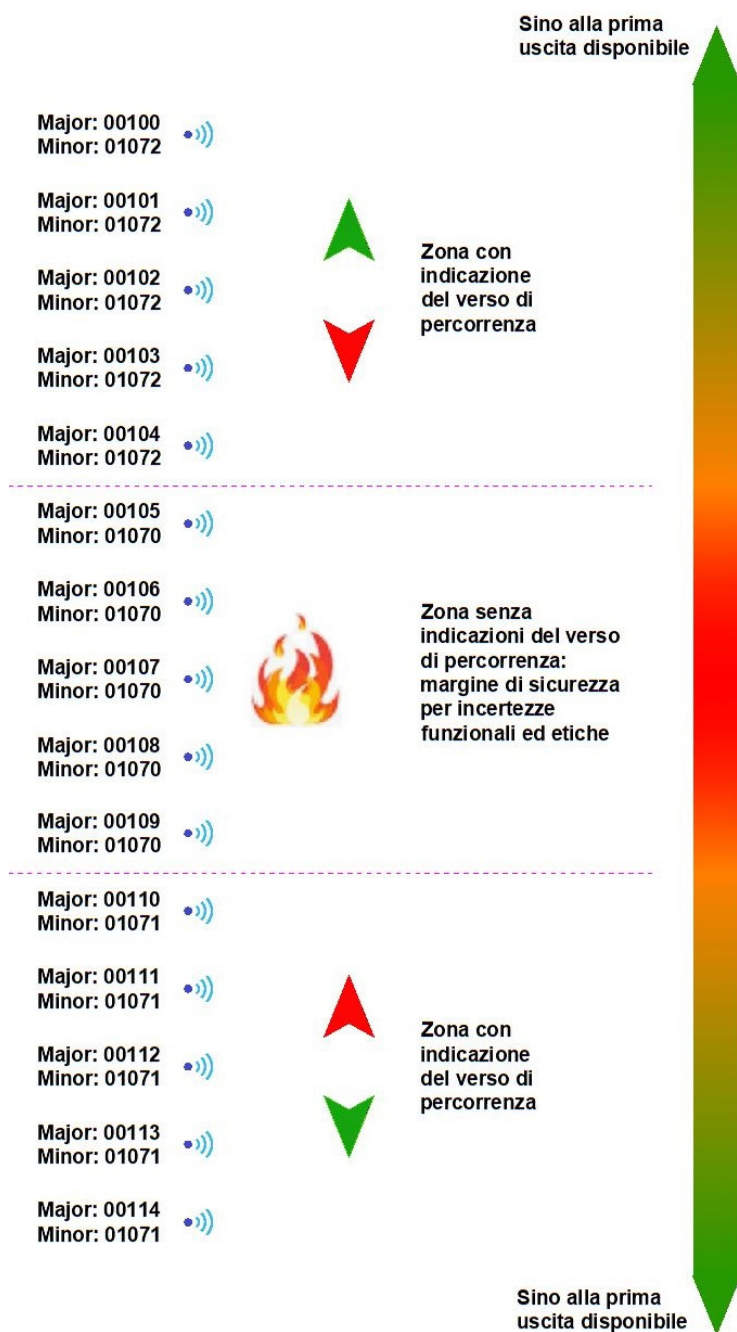


Figura 5.64: programmazione Minor Number nel caso di un incendio in galleria

Al fine di poter descrivere l'esempio di programmazione relativa ai dispositivi BLE di figura 5.64, si immagini che il disegno rappresenti un tratto di parete di una galleria sulla quale sono stati installati 15 Beacon e la relativa rete di controllo illustrata in

figura 5.63. Il Major identifica in modo univoco ogni singolo dispositivo all'applicativo di navigazione, inoltre per ottenere la segnalazione di verso errato (già descritta nel livello di prestazione I) occorre che tale identificativo sia impostato (in fase d'installazione) con ordine crescente a partire da un determinato imbocco di galleria (§ 5.4.5). Nel caso specifico, sul tratto di parete raffigurato, si possono individuare i Beacon con Major dal 100 al 114. I Minor di ogni singolo Beacon invece, a seguito dell'incendio rilevato dalla sensoristica di galleria all'altezza del Beacon 107, sono stati programmati dal sistema in modo da fornire all'app di navigazione, e quindi all'utente, sia la posizione del pericolo sia le indicazioni sul verso di percorrenza da seguire. A tal proposito le prime 4 cifre del Minor di tutti i Beacon vengono programmate per restituire l'identificativo (Major) del Beacon più vicino all'incendio (nell'esempio il 107); in questo modo qualunque segnale BLE di galleria contiene l'informazione sulla posizione dell'incidente. L'ultima cifra del Minor assume invece diversi valori in funzione della posizione dei Beacon rispetto all'incendio e alle uscite di galleria; in questo modo sarà possibile fornire all'utente un'indicazione puntuale sul verso di percorrenza più sicuro da seguire. Nell'esempio sono stati individuati i seguenti valori in riferimento a tre zone di funzionamento:

- 0 - zona senza indicazioni del verso di percorrenza (margine di sicurezza per incertezze funzionali ed etiche);
- 1 - zona con verso di percorrenza nel senso crescente della numerazione Major;
- 2 - zona con verso di percorrenza nel senso decrescente della numerazione Major.

E' possibile inoltre individuare altre zone di interesse, ad esempio assegnare un numero specifico per identificare la presenza di un'uscita nelle vicinanze (in figura 5.64 non sono state disegnate uscite per non complicare la comprensione della grafica).

In condizioni ordinarie il Minor dovrà invece assumere per tutti i Beacon il valore 00000. A tal proposito un aspetto di sicurezza da precisare è la necessità di riportare i Minor al valore neutro 00000 in caso di perdita del funzionamento della rete dati, ad esempio a seguito di un incendio o di un generico guasto. Tale precauzione risulta necessaria per scongiurare di fornire all'utente informazioni non aggiornate e quindi potenzialmente errate e pericolose. In pratica, in caso di mancato funzionamento della rete di programmazione, il valore Minor a 00000 consente comunque di fornire

all'utente le informazioni di localizzazione, senza però fornire indicazioni di percorso in relazione alla situazione di emergenza. Gli accorgimenti tecnici per ottenere tale funzione di sicurezza dovranno essere studiati in base ai protocolli di rete e alle modifiche circuitali da apportare ai Beacon, in ogni caso si prevede di usare una logica di funzionamento a forzatura della programmazione, in pratica valori di Minor diversi da 00000 potranno essere mantenuti nel tempo solo attraverso l'invio ripetuto dei segnali di programmazione, mentre in assenza di tali segnali (opportunamente identificati nel sistema) il Minor dovrà automaticamente riportarsi al valore di default di 00000. E' possibile anche prevedere, in condizioni ordinarie di galleria e con sistema perfettamente funzionante, il mantenimento forzato di uno specifico valore, finalizzato a poter fornire in sicurezza all'utente le semplici informazioni di verso consigliato viste nel livello di prestazione I. Mentre, in caso di danneggiamenti o guasti al sistema, il valore 00000, assunto automaticamente dai Minor, consentirà all'applicativo di navigazione di comprendere la necessità di non fornire alcuna informazione circa il verso consigliato.

Resta inteso, come si è detto, che la gestione appena illustrata del pacchetto dati rappresenta solo un esempio delle possibili soluzioni per realizzare con i Beacon funzioni avanzate di supporto all'esodo. Con programmazioni più articolate risulta possibile fornire all'utente ulteriori informazioni, ad esempio è possibile attivare sull'applicativo di navigazione una serie di messaggi predeterminati sul comportamento da seguire, oppure segnalare eventuali uscite interdette o colonnine SOS guaste. Le soluzioni proposte sono state individuate nell'ottica di realizzare le funzioni principali senza complicare troppo gli aspetti legati alla gestione dei pochi byte disponibili nel pacchetto dati del formato iBeacon (§ 4.4.1). Si ricorda infatti che occorre considerare i limiti logici; ad esempio per quanto riguarda il Major e il Minor si hanno a disposizione solo 2 byte cadauno, quindi in termini decimali sono possibili impostazioni da 0 a 65535. Pur prevedendo che gli accorgimenti individuati consentano già di soddisfare gran parte delle esigenze di esodo, si ritiene opportuno valutare lo sviluppo, nel rispetto delle specifiche BLE, di un formato dati personalizzato.

Come si è visto in figura 5.64, è stata selezionata una zona d'incertezza, dove non sono state assegnate indicazioni sul verso da seguire. Nell'immagine l'estensione di tale zona è modesta per ragioni d'illustrazione grafica, ma in realtà si prevede una maggiore ampiezza intorno alla posizione dell'incidente. Inoltre, come appena detto, è opportuno prevedere anche informazioni e segnalazioni specifiche per le zone interessate dalla presenza di un'uscita di emergenza.

A livello tecnico le zone prive di informazioni di verso rappresentano un margine di sicurezza nei confronti di indicazioni errate dovute a possibili anomalie di propagazione del segnale radio, oppure a guasti delle apparecchiature; ad esempio potrebbe accadere di ricevere con sufficiente potenza il segnale di un Beacon più lontano, il quale invia informazioni errate e quindi potenzialmente pericolose per la reale posizione dell'utente in galleria. Si tratta di aspetti importanti che dovranno essere approfonditi e valutati con ulteriori sperimentazioni sul campo. Ciò nonostante siamo nell'ambito di problematiche tecniche, per le quali si ritiene possibile individuare margini di sicurezza adeguati, mentre si desidera richiamare (§ 3.3) brevemente un delicato aspetto etico legato alle indicazioni fornite all'utente, in particolare quando la galleria si trova in condizioni di emergenza. In generale le informazioni fornite dal sistema di localizzazione risultano utili e contribuiscono ad aumentare la sicurezza in galleria, ma ci si pone il problema al riguardo delle indicazioni perentorie sul percorso più sicuro, soprattutto quando questo viene fornito in condizioni ambientali di rischio elevato. In pratica il timore è quello di fornire un'indicazione che, per una serie di aspetti poco prevedibili (variabilità delle condizioni reali di galleria, malfunzionamenti, ecc.), possa rivelarsi inadeguata, portando così ad un aumento del rischio con eventuali esiti dannosi o addirittura fatali. Tali aspetti non sono oggetto della presente ricerca, ma si è ritenuto doveroso segnalarli per approfondimenti futuri, in modo da poter sviluppare il solutore decisionale sui percorsi di esodo non solo in considerazione degli aspetti tecnici, ma anche di quelli etici.

5.4.7 Riepilogo delle prestazioni fornite dai diversi livelli di funzionamento

Dopo le lunghe descrizioni dei paragrafi precedenti, al fine di semplificare il riepilogo sulle prestazioni del sistema nei diversi livelli di funzionamento, si è ritenuto opportuno sintetizzare il tutto con la seguente tabella 5.3, la quale riporta anche i principali aspetti

legati alle esigenze d'installazione dei Beacon e di realizzazione dell'interfaccia di navigazione.

		Livello di prestazione 0	Livello di prestazione I (condizioni ordinarie)	Livello di prestazione II (condizioni di emergenza)
Esigenze d'installazione	Altezza da terra dei Beacon	3.5 m *	3.5 m *	3.5 m *
	Distanza tra i Beacon lungo le pareti	5 m	5 m	5 m
	Funzionamento garantito solo lungo le pareti di galleria (banchine)	opportuno	opportuno	opportuno
	Rete di programmazione dei Beacon con interfacciamento del sistema alla sensoristica di galleria	non richiesto **	non richiesto **	necessario **
	Cablaggio di alimentazione	opportuno ***	opportuno ***	opportuno ***
Esigenze dell'interfaccia grafica	Linearizzazione della planimetria di navigazione	opportuna	opportuna	opportuna
	Orientamento automatico della planimetria di navigazione coerente con l'ambiente e il punto di vista dell'osservatore	necessario	necessario	necessario
Principali prestazioni fornite	Indoor positioning di base	✓	✓	✓
	Apprezzamento delle distanze dell'utente dalle uscite in modo grafico e relativo	✓	✓	✓
	Visualizzazione numerica delle distanze dalle uscite in base alla posizione dell'utente	✗	✓	✓
	Colorazione opportuna delle frecce indicanti il verso di percorrenza consigliato	✗	✓	✓
	Segnalazione ottica e acustica nel caso l'utente percorra la galleria nel verso sconsigliato o pericoloso	✗	✓	✓
	Visualizzazione della posizione della fonte del pericolo in galleria	✗	✗	✓
	Indicazione dinamica del verso di percorrenza più sicuro in base alla posizione dell'utente, dell'incidente e in generale alle condizioni di galleria	✗	✗	✓

Tabella 5.3: sintesi delle prestazioni offerte dal sistema di localizzazione

* Con i dispositivi utilizzati e nelle condizioni di prova, l'altezza da terra di 3.5 m è quella che ha fornito i risultati sperimentali migliori, ma si ritiene opportuno valutare anche installazioni ad altezze diverse (§ 5.4.1).

** In tabella si è tenuto conto delle esigenze di rete in relazione alle prestazioni fornite in condizioni di corretto funzionamento, ma si ricorda che la connessione in rete dei Beacon può essere sfruttata anche per realizzare un sistema di autodiagnosi di corretto funzionamento, funzione indispensabile in applicazioni di sicurezza.

*** E' possibile alimentare i Beacon solo attraverso una batteria interna, come generalmente avviene con questi dispositivi. Si ritiene però opportuno optare per la realizzazione di un circuito esterno cablato di alimentazione, supportato da dispositivi di accumulo energetico, interni a ciascun Beacon, atti a fornire un'alimentazione di backup indipendente per ogni singolo trasmettitore BLE. Così facendo, oltre ad aumentare l'affidabilità complessiva del sistema di alimentazione, si rende possibile, come vedremo nei prossimi paragrafi, l'utilizzo di componenti supercapacitori in sostituzione di batterie e classici accumulatori elettrochimici.

5.4.8 Stima dei costi di realizzazione al km

Il sistema di localizzazione di galleria proposto in questo elaborato può essere realizzato con diverse configurazioni, a seconda delle prestazioni richieste e delle modalità di alimentazione dei dispositivi BLE. Le opere d'installazione infatti possono limitarsi solo alla semplice posa di Beacon autoalimentati (con batteria al litio interna), oppure richiedere anche l'installazione di condutture di alimentazione e controllo dei dispositivi. In questo secondo caso, peraltro raccomandato, occorre individuare le caratteristiche delle condutture, sia per la realizzazione dei circuiti di energia che per quelli relativi alla rete dati. In particolare occorre definire quali circuiti devono essere realizzati con condutture resistenti al fuoco (§ 5.6), quale architettura utilizzare per la rete dati (rame, ibrida, alimentazione e segnale sullo stesso cavo, ecc.) e quale tipo di posa risulta più opportuna per l'installazione delle condutture in una specifica galleria, anche in base alle tubazioni e ai transiti eventualmente esistenti (sottotraccia, a vista, su passerelle, ecc.). Questi aspetti rendono alquanto articolate le stime sui diversi costi di realizzazione, ma a livello preliminare si ritiene sufficiente fornire alcune indicazioni orientative di massima, dedotte partendo dal costo medio di mercato di un tipico Beacon

BLE e dalle indicazioni (altri materiali, componenti simili e manodopera) ricavate dal prezzario della Regione Lazio, attualmente in vigore.

Si precisa che le stime sono relative solo alla fornitura ed installazione dei componenti in campo lungo la galleria (Beacon, sistema di cablaggio, alimentatori 24 Vdc, convertitori fibra-cavo), pertanto non sono stati considerati altri costi, quali ad esempio quelli relativi alle unità centrali di controllo, all'interfacciamento con il sistema SCADA di galleria e ad ogni tipologia di applicativo software. Inoltre non sono stati considerati i costi organizzativi, di gestione del traffico veicolare, di lavoro notturno e quelli della sicurezza stimabili attraverso il PSC (Piano di Sicurezza e Coordinamento).

Il costo di un tipico Beacon BLE è stato stimato in circa 20 Euro cadauno, tale costo è stato poi elevato a circa 30 Euro, considerando di dotare il dispositivo di una porta/interfaccia di rete, ad esempio per lo standard RS485. Le stime sono state calcolate facendo riferimento al numero di Beacon illustrato nella precedente figura 5.57 (uno ogni 5 metri, su ambo le pareti di galleria). Il costo di mercato, imputabile alla sola fornitura dei Beacon, è stimabile quindi tra 8000 e 12000 Euro/km, a seconda se si considera l'utilizzo di comuni Beacon o di dispositivi modificati per la connessione in rete. Di seguito si riportano le stime sui costi complessivi di fornitura ed installazione di due diverse soluzioni:

- **sistema di base privo di cablaggi**, quindi solo installazione di tipici Beacon BLE autoalimentati da batterie al litio interne. Il sistema consente di raggiungere il livello di prestazione I, non sono previsti sistemi di programmazione real time, inoltre non sono stati calcolati i costi per realizzare un sistema wireless di autodiagnosi di funzionamento: **18000 euro circa per ogni km di galleria**;
- **sistema completo cablato** (alimentazione e rete dati) con Beacon dotati di circuito per l'alimentazione esterna ed interfaccia di rete. Il sistema sarà in grado di raggiungere il livello di prestazione II, con programmazione real time e autodiagnosi in rete, nonché predisposizione per supportare l'alimentazione di backup a supercapacitori (§ 5.6.1 e 5.6.2): **da 100000 a 150000 euro circa per ogni km di galleria**, a seconda delle caratteristiche dei cablaggi (tipo di posa e prestazioni delle condutture in relazione alla reazione e resistenza al fuoco). Si sottolinea che con l'utilizzo di alimentazione autonoma di backup all'interno di ciascun Beacon è possibile valutare anche l'utilizzo di un sistema cablato non

resistente al fuoco, portando così i costi di realizzazione verso il valore inferiore del range sopra stimato.

Si precisa che le stime sono state formulate senza considerare l'imposta sul valore aggiunto, ma senza neppure considerare riduzioni sui costi, probabilmente ottenibili, su forniture ed installazioni di elevata consistenza.

5.4.9 La fruizione su smartphone e l'interfaccia di navigazione

Nella presente ricerca, oltre ad affrontare gli aspetti legati alle tecniche e all'ottimizzazione delle funzioni di localizzazione in galleria, sono stati considerati anche diversi aspetti legati all'interfaccia grafica di navigazione che dovrà operare sullo smartphone dell'utente. A tal proposito, pur senza spingersi nell'ambito della programmazione software, sono state fornite diverse soluzioni e indicazioni utili allo sviluppo dell'applicativo. La linearizzazione della planimetria di navigazione (§ 5.4.3), ad esempio, rappresenta certamente un accorgimento grafico rilevante, non solo in relazione al miglioramento della localizzazione e alla riduzione dell'impegno computazionale e di memorizzazione dello smartphone, ma anche al riguardo della semplificazione delle informazioni da fornire all'utente. Risulta ovvio che informazioni semplici e velocemente comprensibili sono indispensabili per un'interfaccia chiamata ad operare in condizioni di emergenza, dove notoriamente l'agitazione e il panico rendono tutto più difficile. Seguendo quest'ottica sono stati realizzati anche alcuni esempi grafici dell'interfaccia operante nei diversi livelli di funzionamento (§ 5.4.4, 5.4.5 e 5.4.6), inoltre sono state fornite alcune indicazioni in merito al punto di vista dell'osservatore, quindi sull'importanza dell'orientamento di planimetrie e indicazioni in coerenza con l'ambiente circostante (§ 5.4.3).

Con questo breve richiamo sull'interfaccia grafica si desidera sottolineare che oltre agli aspetti di positioning e di programmazione dei Beacon, risulta di primaria importanza sviluppare un applicativo in grado di restituire semplicità di utilizzo e informazioni brevi e altamente comprensibili. A tal proposito si consiglia di sviluppare l'app attraverso simulazioni in galleria in grado di apprezzare l'efficacia comunicativa delle soluzioni individuate.

Per completezza si desidera evidenziare anche alcuni semplici aspetti relativi alla gestione dell'app di navigazione. Come si è detto, a differenza del software dimostrativo utilizzato nella sperimentazione (§ 5.1.1), l'applicativo di galleria dovrà garantire il funzionamento senza la necessità di dover agganciare la rete cellulare o wi-fi. Il funzionamento BLE in broadcasting, pur senza richiedere connessioni, necessita però dell'accensione sullo smartphone della ricevente bluetooth; tale attivazione dovrà pertanto realizzarsi automaticamente con il semplice lancio dell'applicazione, senza che sia richiesta alcuna ulteriore conferma. Ogni dato utile alla navigazione dovrà già essere presente nella memoria dello smartphone, pertanto si prevede che tutte le planimetrie e i dati di galleria siano scaricati ed installati sullo smartphone insieme all'applicativo.

Si prevede che con l'utilizzo di semplici planimetrie linearizzate, la quantità di dati da memorizzare si riduca significativamente, ciò non toglie che la memorizzazione di un grande numero di gallerie possa rendere pesante la gestione dell'applicazione (download, installazione e aggiornamento). Sono aspetti che andranno affrontati nell'ambito degli sviluppi software, in ogni caso è possibile valutare soluzioni atte a limitare il pacchetto dati, ad esempio prevedendo la possibilità di caricare solo le gallerie di una nazione o di un vasto territorio di interesse, oppure realizzare applicazioni dedicate ad una determinata area geografica.

In generale l'app di galleria potrà essere distribuita all'utenza attraverso i noti canali web, quindi attraverso Play Store e App Store, con l'accortezza di evidenziare e rendere estremamente chiare e disponibili le istruzioni di corretto utilizzo, le gallerie servite e l'importanza di eseguire o consentire gli aggiornamenti automatici. Questi ultimi, come è ovvio, sono indispensabili per allineare i dati in possesso degli utenti con le eventuali modifiche apportate ai sistemi BLE (posizione dei Beacon, parametri identificativi, gestione dei dati trasmessi, ecc.) o all'ambiente di ogni galleria (planimetrie, uscite di emergenza, colonnine SOS, ecc.).

Si ricorda inoltre che per usufruire del servizio di galleria l'utente deve disporre di uno smartphone compatibile; la principale compatibilità, come si è visto, è quella relativa alla versione bluetooth, ma occorre considerare, a seconda delle soluzioni tecniche adottate, anche la disponibilità di sensori interni allo smartphone, come ad esempio quelli relativi alla bussola e al giroscopio. Con i moderni dispositivi tali aspetti non rappresentano un problema, in quanto le caratteristiche e le dotazioni sono ampiamente

superiori a quelle richieste, mentre con gli smartphone non compatibili i rischi di un inaspettato mancato o errato funzionamento non si possono presentare, in quanto la mancanza di compatibilità non dovrà consentire l'installazione dell'applicazione, come avviene generalmente con le app presenti sugli Store. A questo punto, auspicando di raggiungere un tale interesse, si riporta in figura 5.65 un logo di esempio per l'app relativa all'applicazione IPS di galleria trattata in questo elaborato.



Figura 5.65: logo app IPS di galleria

5.5 Individuazione di altre funzioni e applicazioni di sicurezza

Il sistema di localizzazione, sin qui trattato, è stato studiato prevalentemente per offrire supporto all'utente di galleria in condizioni di autosoccorso. La possibilità di poter essere localizzati lungo la galleria con un'accuratezza dell'ordine di pochi metri consente però d'individuare facilmente altre applicazioni. Rimanendo nell'ambito della sicurezza in galleria, si ritiene interessante valutare l'utilizzo dell'IPS anche per le seguenti attività:

- supporto alle squadre di soccorso e richiesta di aiuto da parte dell'utente;
- supporto alla gestione della manutenzione;
- supporto alla guida;
- supporto ai sistemi di guida e controllo di macchine automatiche e dispositivi robotici.

5.5.1 Supporto alle squadre di soccorso e richiesta di aiuto da parte dell'utente

Le indicazioni sulla propria posizione in galleria, nonché le informazioni circa le uscite più vicine, possono certamente risultare utili anche alle squadre di soccorso. Il recupero di persone in ambiente confinato e in condizioni di emergenza può presentare infatti

significative difficoltà, in particolare quando si è chiamati ad intervenire in condizioni di scarsa visibilità, come accade generalmente in caso d'incendio. In simili situazioni di galleria, anche un soccorritore esperto può perdere l'orientamento e con esso minuti preziosi per portare in salvo l'infortunato e poi se stesso. L'IPS di galleria, così come descritto, si propone quindi di supportare sia l'autosoccorso dell'utente che le operazioni di salvataggio da parte degli operatori preposti.

Quando sia l'utente che le squadre d'intervento usano il sistema di localizzazione proposto, la sinergia di utilizzo facilita certamente sia l'autosoccorso che il soccorso da parte degli operatori. A tal proposito si ritiene interessante individuare accorgimenti finalizzati a favorire ulteriormente la localizzazione dell'utente da parte del soccorritore; si premette però che le soluzioni di seguito indicate abbracciano aspetti tecnici che necessitano di ulteriori studi e sperimentazioni, in particolare in merito all'impegno e saturazione dei canali utilizzati (§ 4.4.1), nonché in merito all'utilizzo di Beacon BLE particolari e concettualmente diversi da quelli utilizzati nei sistemi precedentemente visti. A livello preliminare si ritiene interessante valutare sviluppi futuri indirizzati ad ottenere le seguenti funzioni:

Funzione *radio-bo* - Con l'attivazione dell'applicativo di navigazione da parte dell'utente, oltre ad avviare le funzioni di supporto previste per l'autosoccorso, si potrebbe prevedere l'attivazione (automatica o a richiesta dell'utente) di una tipica trasmissione con funzione di radio-bo, ovvero un segnale radio, contenente opportune informazioni, sfruttabile dalle squadre di soccorso per individuare, ad una certa distanza, un utente in difficoltà. Le frequenze e le tecniche di trasmissione, da individuare in fase di sviluppo nei limiti delle possibilità offerte dai comuni smartphone, dovranno tener conto principalmente di aspetti legati alle interferenze e alla saturazione dei canali utilizzati. Si ritiene interessante valutare l'utilizzo della versione bluetooth 5.1 (§ 4.4), la quale consente di determinare la direzione del segnale attraverso l'angolo di arrivo o l'angolo di partenza (§ 4.4, figura 4.10). In questo caso si dovrà sfruttare il metodo AoA, in quanto le particolari antenne multiple, necessarie per determinare la direzione, saranno da realizzare su appositi dispositivi ricevitori da destinare all'attività di soccorso (terminali di soccorso). In pratica, un simile sistema consentirebbe alle squadre di soccorso di captare il segnale radio-bo emesso dallo smartphone dell'utente

nel raggio di qualche decina di metri e, entro certi limiti, di determinare anche la sua direzione. Una maggiore portata radio, senza installare ulteriori apparecchiature (ripetitori) in galleria, si potrebbe ottenere migliorando le prestazioni delle antenne e in generale dello stadio ricevente dei terminali di soccorso; in questo modo sono prevedibili distanze di ricezione sino a qualche centinaio di metri. In presenza di più smartphone con l'applicazione di navigazione attiva, si potrebbe migliorare ulteriormente il raggio di portata del segnale radio-boa, implementando nell'applicativo una funzione di *crowdsourcing* sul segnale di soccorso²⁹.

Funzione *sono qui* - In questo progetto di ricerca, escludendo le modeste modifiche hardware e software necessarie per l'ottenimento del livello di prestazione II (§ 5.4.6), sono stati utilizzati tipici Beacon BLE disponibili in commercio. Si ritiene comunque interessante valutare la possibilità di utilizzare dispositivi BLE appositamente sviluppati per gestire i segnali in modo bidirezionale (trasmissione e ricezione). A tal proposito si immagina che il sistema illustrato nella precedente figura 5.63 sia invece realizzato con Beacon in grado non solo di trasmettere i propri dati identificativi, ma anche di ricevere quelli relativi agli smartphone degli utenti presenti in galleria. Si otterrebbe così una rete bidirezionale in grado di fornire la posizione dell'utente non solo al soggetto stesso, ma anche alle squadre di soccorso e in generale al gestore della rete stradale, in quanto i dati potranno essere resi disponibili in lan, wan e internet.

L'interfaccia remota, in modo analogo all'applicativo operante sullo smartphone dell'utente, visualizzerà il soggetto in prossimità del Beacon che ha ricevuto il segnale più forte, in questo caso proveniente dallo smartphone dell'utente. A questo punto risulta semplice realizzare anche una funzione di richiesta di soccorso da parte dell'utente, il quale, ad esempio, potrà inviare un segnale per la richiesta di intervento medico o meccanico, senza dover raggiungere una colonnina di SOS.

Si precisa che la modalità *crowdsourcing*, individuata precedentemente per la funzione *radio-boa*, non è necessaria e non è compatibile con le presenti funzioni bidirezionali.

²⁹ Ogni smartphone presente in galleria (con l'applicazione attiva) assume anche la funzione di ripetitore dei segnali di *radio-boa* emessi dagli altri utenti. In questo modo, in presenza di più applicazioni attive e nei limiti di portata, si ottiene una sorta di rete wireless utile alle squadre di soccorso per l'individuazione delle persone presenti in galleria.

Un sistema bidirezionale consente inoltre lo sviluppo di funzioni interattive, sia in condizioni ordinarie che di emergenza, che possono superare significativamente le funzioni del sistema unidirezionale, senza contare la possibilità di poter memorizzare il comportamento in galleria degli utenti, al fine di ottenere informazioni utili al miglioramento di molteplici aspetti connessi con la gestione dell'infrastruttura stradale. Come si è detto, lo sviluppo di un sistema di questo tipo richiede ulteriori studi e approfondimenti, in particolare in merito all'impegno dei canali radio, nonché al riguardo della sostenibilità economica. Si ritiene comunque che il costo di un Beacon bidirezionale possa essere contenuto e accettabile, soprattutto in relazione alle funzioni ottenibili.

5.5.2 Supporto alla gestione della manutenzione

In questi ultimi anni, crescenti esigenze di sicurezza e di efficientamento, hanno contribuito pesantemente al mutamento del concetto e delle necessità di manutenzione. In molti ambiti infatti la manutenzione reattiva e preventiva si è arricchita di approcci gestionali basati sulla manutenzione migliorativa e predittiva. Un approccio evoluto, come appunto quello predittivo, risulta efficace solo se si dispongono di sufficienti dati, nel tempo e nello spazio, sulle condizioni del sistema sotto osservazione. L'indoor positioning proposto, con i suoi dati sulla posizione dell'operatore lungo la galleria e quindi sulla posizione dell'intervento manutentivo, porta certamente un contributo positivo alla quantità e qualità dei dati di manutenzione. Come è noto, un buon piano di manutenzione richiede il censimento degli elementi interessati, al fine di conoscere nel tempo gli interventi eseguiti su ogni singolo elemento costituente il sistema. Questa tecnica, particolarmente utilizzata nella manutenzione a rotazione o nelle verifiche a campione, risulta però relativamente semplice se applicata ad apparecchiature e in generale ad elementi puntuali che consentano l'apposizione di una targa o di un QR Code identificativo, mentre si dimostra di difficile o quantomeno noiosa applicazione nei confronti di porzioni di elementi estesi, come ad esempio condutture, cavidotti e tubazioni in genere, ma anche per tratte di pareti e pavimentazioni. Si ritiene che la possibilità di utilizzare un marcatore posizionale, che consenta di registrare facilmente la posizione dell'intervento lungo la galleria, rappresenti un supporto significativo alla gestione della manutenzione.

Come si è visto, per l'utente di galleria è prevista la fruizione delle informazioni di localizzazione attraverso un comune smartphone, ma nel caso dell'operatore addetto alla manutenzione è possibile invece prevedere un dispositivo ricevente ottimizzato, sia sotto il profilo delle prestazioni di localizzazione sia in merito alle esigenze di manutenzione. A tal proposito saranno naturalmente necessari specifici applicativi software per gestire i dati posizionali in associazione agli interventi di manutenzione.

A questo punto il passo è breve per consentire all'IPS di galleria di trovare un posto di primo piano all'interno di un sistema di gestione certificata della manutenzione. Come sappiamo la certificazione del processo manutentivo è un aspetto di sicurezza molto attuale e sentito sul tavolo normativo nazionale e internazionale, nonché a livello dell'opinione pubblica di ogni paese, si ritiene pertanto interessante proporre le soluzioni individuate nella presente ricerca per portare un contributo anche a questo specifico aspetto della manutenzione. A tal proposito, pur senza spingersi in aspetti legati alle procedure di certificazione, si ritiene possibile sfruttare l'IPS di galleria per realizzare un sistema in grado di certificare la presenza di un operatore, per un certo periodo di tempo e in un dato punto della galleria. A livello del tutto preliminare si potrebbe prevedere l'utilizzo di un dispositivo mobile in grado di memorizzare sia le informazioni e le immagini di manutenzione caricate direttamente dall'operatore durante l'intervento, sia i riferimenti posizionali e temporali relativi all'intervento stesso. Successivamente l'operatore, al rientro in sede, dovrà scaricare nel gestionale di manutenzione tutti i dati acquisiti dal suo terminale. Naturalmente l'applicativo e le procedure dovranno essere studiate e certificate contro possibili manomissioni a livello dei dati memorizzati.

5.5.3 Supporto alla guida

Lo studio bibliografico e in generale l'osservazione dello stato dell'arte effettuati durante la presente attività di ricerca non hanno evidenziato la presenza di sistemi di indoor positioning di galleria dedicati ad applicazioni di sicurezza e in particolare al supporto dell'esodo pedonale. E' stata però individuata un'applicazione di Waze in via di sviluppo [F12], finalizzata ad estendere il funzionamento del suo navigatore stradale anche durante la guida all'interno delle gallerie (§ 4.5.2). Il sistema di Waze, viste le finalità, prevede l'installazione di trasmettitori radio lungo la galleria a distanze molto

maggiori di quelle previste nel nostro progetto, inoltre non si rilevano al momento informazioni in merito ad altre funzioni o a reti di controllo dei parametri trasmessi dai dispositivi. Pertanto si ritiene che l'IPS proposto nel presente elaborato possa assolvere con maggior accuratezza anche alle funzioni di navigazione veicolare. Inoltre, vista l'architettura ad elevata densità di punti di riferimento del nostro IPS, si ritiene possibile sfruttarlo anche per fornire utili riferimenti posizionali a supporto di applicazioni di guida autonoma.

5.5.4 Supporto ai sistemi di guida di macchine automatiche e dispositivi robotici

Considerando le caratteristiche del sistema proposto, si ritiene possibile individuare applicazioni anche nell'ambito della guida e controllo di dispositivi robotici, con o senza operatore a bordo. In pratica le informazioni di positioning disponibili lungo tutta la galleria possono essere senz'altro sfruttate come riferimento posizionale per controllare o supportare gli spostamenti di unità robotiche all'interno dell'infrastruttura stradale. Tale applicazione può quindi migliorare significativamente l'utilizzo di macchine automatiche, sia nell'ambito degli interventi di manutenzione che in operazioni di emergenza, come ad esempio il soccorso di persone e la lotta antincendio con robot.

5.6 Approfondimenti sull'alimentazione e il controllo dei Beacon

In questa sezione dell'elaborato si desidera riprendere alcuni aspetti legati all'alimentazione e al controllo dei dispositivi BLE, in particolare in merito all'affidabilità delle condutture di energia e di segnale e quindi all'affidabilità di funzionamento complessiva dell'IPS di galleria. Inoltre, sempre nell'ambito delle possibili soluzioni di alimentazione dei Beacon, sarà esposto un innovato sistema di alimentazione di backup con l'utilizzo di componenti supercapacitori installati a livello di ciascun dispositivo BLE, sia per eliminare batterie e classici accumulatori elettrochimici che per aumentare i livelli di disponibilità dell'alimentazione.

I Beacon BLE disponibili in commercio sono generalmente alimentati con una batteria interna al litio. Tale batteria, nella maggior parte dei casi, è dimensionata per garantire una durata variabile da 1 a 5 anni circa, a seconda delle impostazioni relative alla

potenza e all'intervallo di trasmissione. Ad esempio con il dispositivo BlueBeacon Forte, da noi utilizzato, e con le impostazioni individuate nella sperimentazione di galleria (Power Tx 0 dBm e Advertising Interval 100 ms), il datasheet del produttore stima (con la batteria in dotazione tipo CR17345 da 1500 mAh) una durata di circa 11 mesi. Naturalmente aumentando la capacità della sorgente elettrochimica è possibile allungare la durata di funzionamento, ma l'utilizzo di una batteria interna ad ogni Beacon rappresenta comunque un aspetto negativo sia in termini di manutenzione che di impatto ambientale. Ciò nonostante l'alimentazione autonoma rende il funzionamento di ciascun dispositivo BLE indipendente dall'affidabilità di un circuito di alimentazione esterno comune.

Gli aspetti affidabilistici dei circuiti di alimentazione sono noti e ampiamente trattati sia dalle normative elettriche generali (es. CEI 64-8) che da quelle specifiche di galleria, come ad esempio la CEI 64-20. Come è noto, se uno o più dispositivi preposti a funzioni di sicurezza (es. lampade di emergenza) non dispongono di un'adeguata alimentazione interna autonoma, è necessario che il circuito di alimentazione esterno sia un circuito di sicurezza, il quale deve garantire un adeguato livello di resistenza sia alle condizioni ambientali ordinarie sia a quelle che si possono realizzare in caso di incidente. I circuiti per l'alimentazione di sicurezza infatti, oltre a dover essere adeguatamente protetti dalle normali influenze esterne (acqua, polvere, urti, ecc.), come ogni altro circuito elettrico, devono offrire una certa resistenza contro gli effetti di un incendio e in generale devono garantire la disponibilità dell'alimentazione per un determinato periodo di tempo in condizioni di emergenza.

In generale per valutare l'affidabilità di un sistema di alimentazione occorre considerare non solo le caratteristiche delle sorgenti di energia (rete, gruppi elettrogeni, UPS, ecc.), ma anche le caratteristiche delle condutture (cavi, tubazioni, cassette, morsetti, ecc.). In merito alle condutture, queste possono essere resistenti al fuoco per installazione o per costruzione. Nel primo caso, normali cavi possono assumere caratteristiche di resistenza al fuoco in base al tipo di posa (ad esempio sottotraccia), mentre nel secondo caso sono proprio le caratteristiche costruttive del cavo che garantiscono la resistenza al fuoco. Ad esempio il noto cavo di energia FTG10OM1³⁰- PH90/120 viene realizzato per superare la prova di resistenza al fuoco ad una temperatura di 830 °C; per 90 minuti se il

³⁰ Il presente cavo, per l'utilizzo in galleria, è stato sostituito dal cavo FTG18OM16, conforme al Regolamento Prodotti da Costruzione UE 305/2011[A9]. In seguito si riportano maggiori informazioni.

diametro è ≤ 20 mm (CEI EN 50200), oppure per 120 minuti se il diametro è $>$ di 20 mm (CEI EN 50362) [B14] [B16].

In modo analogo è possibile individuare caratteristiche di resistenza al fuoco, e in generale di affidabilità di funzionamento, anche per realizzare la rete dati, sia essa in cavo di rame o in fibra ottica. Oggi infatti sono disponibili in commercio cavi di rete e fibre dati in grado di offrire soddisfacenti caratteristiche di resistenza al fuoco.

Dopo questo breve richiamo sui circuiti di sicurezza, si ricorda che per la realizzazione dell'IPS di galleria sono stati individuati 3 livelli di prestazione (0, I e II). A tal proposito, come illustrato precedentemente, oltre al sistema di alimentazione dei Beacon è prevista la realizzazione di una rete dati, quest'ultima sia per raggiungere il livello di prestazione II, che per realizzare un sistema di autodiagnosi di corretto funzionamento relativo ad ogni livello prestazionale. Un'esecuzione ottimale richiederebbe quindi la realizzazione di configurazioni circuitali di sicurezza, sia per l'alimentazione esterna che per i dati; in ogni caso la perdita della sola rete dati, durante un evento incidentale di galleria, non compromette il mantenimento delle funzioni di localizzazione e di indicazione delle distanze dalle uscite di galleria (livello di prestazione I). Si ricorda però che è necessario adottare le precauzioni che consentano al Minor di tornare automaticamente al valore di default 0000 in caso di perdita delle funzioni di rete (§ 5.4.6).

Premesso che il sistema di autodiagnosi dei parametri di funzionamento (§ 5.4.2) dovrà monitorare anche quelli relativi all'alimentazione, si ritiene opportuno realizzare un considerevole livello di ridondanza per alimentare i Beacon, in modo da elevare significativamente l'affidabilità dell'IPS di galleria, in particolare per garantire le funzioni dei livelli di prestazione 0 e I.

La tabella 5.4, riportata di seguito, schematizza il giudizio sulle diverse soluzioni di alimentazione.

Giudizio sui sistemi di alimentazione dei dispositivi BLE		
Circuito esterno non di sicurezza		Non accettabile per ragioni di affidabilità
Circuito esterno di sicurezza		Nessuna ridondanza. In caso di guasti sul circuito di alimentazione (es. guasto serie) si può avere l'interruzione del funzionamento di un'intera tratta o del servizio complessivo
Batteria interna a ciascun Beacon		Nessuna ridondanza. In caso di batteria scarica o guasta si ha la perdita del funzionamento del singolo Beacon. Aspetti negativi in merito alla manutenzione e all'impatto ambientale
Circuito esterno non di sicurezza e accumulatore elettrochimico interno a ciascun Beacon		Ridondanza semplice. Aspetti negativi in merito alla manutenzione e all'impatto ambientale
Circuito esterno di sicurezza e accumulatore elettrochimico interno a ciascun Beacon		Ridondanza rinforzata. Aspetti negativi in merito alla manutenzione e all'impatto ambientale
Circuito esterno di sicurezza e supercapacitore interno a ciascun Beacon		Ridondanza rinforzata. Aspetti soddisfacenti in merito alla manutenzione e all'impatto ambientale

Tabella 5.4: giudizio schematico sui sistemi di alimentazione dei dispositivi BLE

* Si tratta di un sistema innovativo per l'alimentazione dei dispositivi BLE, pertanto le prestazioni individuate in questa prima sperimentazione (§ 5.6.2) andranno confermate con ulteriori approfondimenti e sperimentazioni. Si evidenzia che con l'utilizzo di supercapacitori di backup, interni a ciascun Beacon, sarà possibile valutare anche la possibilità di realizzare un circuito di alimentazione esterno di tipo ordinario, così come è possibile oggi fare con i tradizionali accumulatori elettrochimici.

L'utilizzo di un circuito ordinario, al posto di un circuito di sicurezza, consente di ridurre i costi di realizzazione, ma riduce l'affidabilità complessiva del sistema di alimentazione, pertanto tale soluzione dovrà essere attentamente valutata in termini di costi/benefici. Si ritiene inoltre che la soluzione con circuito ordinario e supercapacitori, vista l'originalità della soluzione, necessiti di un'esplicita approvazione anche a livello del tavolo normativo.

Si evidenzia che in presenza di una sorgente di energia interna al Beacon, sia essa preposta all'alimentazione continua o di backup, è opportuno prevedere un sistema per operare la disalimentazione di reset, senza necessariamente dover intervenire fisicamente sul dispositivo BLE. Tale funzione può essere utile durante gli interventi di manutenzione o in caso di malfunzionamenti, ad esempio a seguito dell'inibizione dell'accesso via bluetooth (§ 5.4.2), oppure per riavviare il dispositivo a seguito di un blocco di funzionamento, sempre possibile con le apparecchiature elettroniche. Il sistema di reset potrà essere realizzato in concomitanza con lo sviluppo dell'interfaccia di rete (§ 5.4.6), in modo da poter operare da remoto.

5.6.1 Caratteristiche del cablaggio di alimentazione

In coerenza con quanto si è detto sulla ridondanza del sistema di alimentazione, si ritiene opportuno, nonché economicamente sostenibile, alimentare i Beacon con un circuito di sicurezza supportato da supercapacitori di backup interni a ciascun dispositivo BLE, come descritto nel paragrafo successivo.

Le caratteristiche di resistenza al fuoco del circuito di sicurezza potranno essere ottenute con opportune modalità di posa, oppure direttamente attraverso l'utilizzo di un cavo idoneo, ad esempio FTG18OM16³¹.

A livello preliminare si prevede di realizzare dorsali operanti in bassissima tensione di sicurezza (SELV), ad esempio a 24 Vdc; tale valore di tensione sarà poi ridotto ulteriormente da un convertitore DC-DC posto a livello di ogni singolo Beacon, in

³¹ Il cavo FTG18OM16 è il nuovo cavo resistente al fuoco, conforme al Regolamento Prodotti da Costruzione (CPR), tale cavo (nelle opere di ingegneria civile) sostituisce in pratica il vecchio FTG10OM1, che è resistente al fuoco, ma non è conforme al CPR. Il nuovo cavo FTG18OM16 presenta una classe di reazione al fuoco B2ca-s1a,d1,a1, che risulta idonea all'impiego in galleria.

Si ricorda che ai sensi del Regolamento Prodotti da Costruzione UE 305/2011[A9], dal 1 luglio 2017, nelle opere di ingegneria civile, è obbligatorio utilizzare cavi con determinati requisiti di reazione al fuoco, in base alle caratteristiche di rischio dei luoghi d'installazione. Nelle gallerie stradali, considerate ad alto rischio in caso d'incendio, sono richiesti cavi CPR con classe di reazione al fuoco di elevata prestazione, almeno B2ca-s1a,d1,a1. La classe di reazione al fuoco tiene conto della capacità del cavo di non propagare l'incendio, di non emettere fumi opachi, gocciolamenti incandescenti e gas acidi. Elevate prestazioni in termini di reazione non implicano necessariamente anche la capacità del cavo di resistere al fuoco, ovvero di continuare a funzionare anche sotto l'azione dell'incendio. Ad esempio tipici cavi CPR di galleria come l'FG18OM16 e l'FG18OM18, aventi ambedue classe di reazione al fuoco B2ca-s1a,d1,a1, non presentano caratteristiche di resistenza al fuoco, quindi per essere utilizzati in circuiti di sicurezza necessitano di adeguate protezioni da attuare in fase d'installazione (ad esempio posa sottotraccia ad adeguate profondità). Con la variante V2 della norma CEI 20-45, entrata in vigore il 1° ottobre 2019, sono divenuti disponibili cavi resistenti al fuoco conformi al regolamento CPR, con classe di reazione al fuoco B2ca-s1a,d1,a1, come appunto i cavi per energia FTG18OM16 e FTG18OM18.

modo da alimentare correttamente sia il dispositivo BLE che lo stadio di accumulo a supercapacitori.

Si ricorda inoltre che le prestazioni di resistenza al fuoco devono essere fornite non solo dal cavo, ma anche dagli altri elementi costituenti la conduttura (cassette, morsetti, ecc.). Solo in questo modo è possibile ottenere la prevista integrità funzionale del circuito di alimentazione in caso d'incendio.

In considerazione che il sacrificio di alcuni Beacon (limitatamente alla zona interessata dall'incendio) può ritenersi accettabile, è possibile evitare l'installazione di condutture resistenti al fuoco per realizzare le derivazioni (stacchi) verso ogni singolo Beacon. In ogni caso questi dettagli dipendono dall'architettura del cablaggio, pertanto dovranno essere valutati, caso per caso, in sede progettuale; l'importante è garantire l'integrità delle dorsali nel caso di perdite a livello dei singoli Beacon, in modo da mantenere correttamente alimentati tutti i restanti dispositivi non interessati dall'incendio.

Lo schema unifilare a blocchi di figura 5.66 illustra un esempio di quanto sopra descritto.

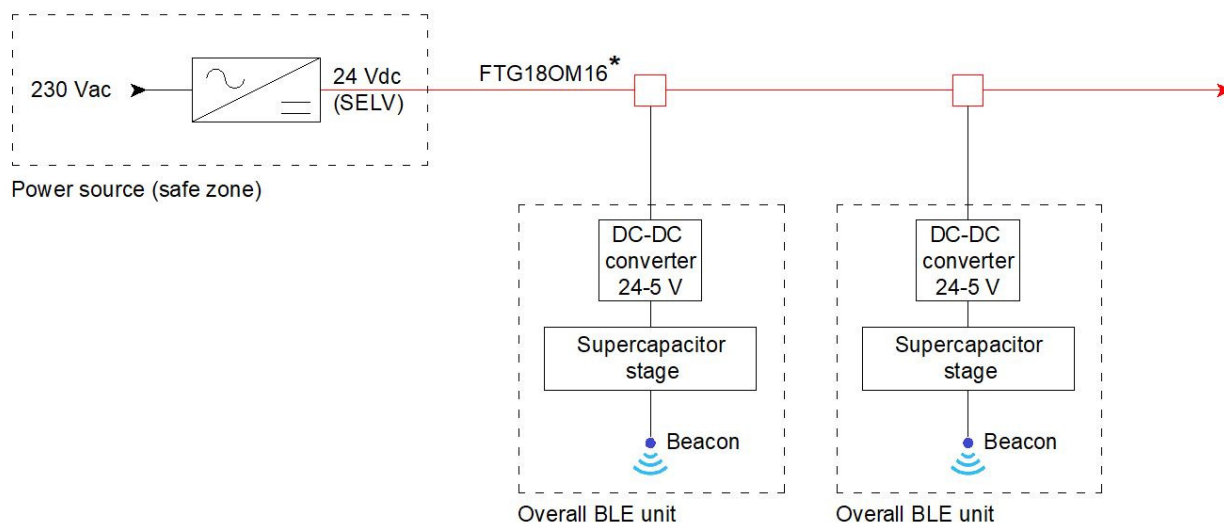


Figura 5.66: alimentazione Beacon BLE

* in colore rosso si evidenzia la dorsale di alimentazione realizzata con un cavo resistente al fuoco, conforme al Regolamento Prodotti da Costruzione UE 305/2011 [A9], avente classe di reazione al fuoco B2ca-s1a,d1,a1.

Si precisa che in figura 5.66, al fine di semplificare lo schema, sono state considerate solo le condutture di alimentazione e non la rete dati, inoltre i Beacon risultano alimentati direttamente dalla dorsale principale, anziché da una dorsale di tratta, come è stato invece raffigurato nello schema generale di figura 5.63. Sempre per semplificare, anche in questo schema non sono stati riportati riferimenti al merito alla protezione delle condutture contro le sovracorrenti. Si ricorda che in generale nei circuiti per l'alimentazione di sicurezza è richiesto di realizzare solo la protezione dal corto circuito e non quella dal sovraccarico [B4], quest'ultima peraltro non particolarmente rilevante con i carichi di nostro interesse. Nella presente applicazione tali aspetti meritano di essere approfonditi, in ogni caso le necessarie protezioni dovranno essere presenti a monte delle dorsali e di ogni derivazione. Ad esempio, riferendosi allo schema semplificato di figura 5.66, le protezioni delle condutture in bassissima tensione di sicurezza dovranno essere presenti sia a livello dell'uscita a 24 Vdc dell'alimentatore di dorsale, sia a livello delle derivazioni verso ogni DC-DC a servizio del singolo Beacon. Il dimensionamento di tali protezioni è un classico aspetto elettrico che dovrà essere affrontato in sede di stesura del progetto esecutivo, naturalmente le protezioni dovranno garantire la completa selettività serie e parallela; in pratica un corto circuito a livello di un singolo Beacon dovrà far intervenire solo la sua protezione, senza quindi interferire con la corretta alimentazione dei restanti dispositivi.

Lo stadio DC-DC (input 24 Vdc, output 5 Vdc), oltre ad adattare la tensione di alimentazione per lo stadio successivo, dovrà consentire l'isolamento galvanico dei Beacon dalla rete di alimentazione. In modo analogo dovrà essere previsto un disaccoppiamento anche a livello dell'interfaccia di rete dati, come è stato indicato in figura 5.63 (§ 5.4.6). Gli accorgimenti sull'isolamento galvanico, attuabili con componentistica elettronica nota e di basso costo, sono da considerarsi precauzioni preliminari contro eventuali disturbi, come ad esempio interferenze elettromagnetiche e loop di massa. I Beacon infatti sono stati progettati per operare stand alone con batterie interne, quindi in condizioni di isolamento elettrico totale, pertanto si ritiene opportuno prevedere accorgimenti atti a limitare le interferenze dovute a connessioni basate su architetture di rete. A tal proposito si precisa che durante la sperimentazione i Beacon sono stati utilizzati prevalentemente con la batteria interna e solo in alcune brevi prove in laboratorio si è provveduto a testare il funzionamento con una rete di alimentazione

esterna e con l'utilizzo di un DC-DC converter in grado di operare anche l'isolamento galvanico. In tali prove non sono stati rilevati malfunzionamenti, ma si ritiene necessario realizzare sperimentazioni estese ed approfondite in galleria, sia in merito all'alimentazione che alla rete dati.

Come è stato evidenziato in merito alla vulnerabilità del sistema (§ 5.4.2), le condutture devono risultare sufficientemente protette non solo dall'incendio, ma anche da altre tipologie di eventi, come ad esempio l'urto veicolare. A tal proposito sarà necessario adottare accorgimenti basati sull'altezza di posa, oppure sull'utilizzo di protezioni dall'opportuna resistenza meccanica.

Ritornando per un attimo ad aspetti di affidabilità legati alla manutenzione delle condutture (connessioni comprese), si segnala la necessità di adottare i necessari accorgimenti per contrastare il cosiddetto *guasto serie*, ovvero tutti quei guasti elettrici che possono avvenire in serie al circuito (falsi contatti, archi, ecc.), i quali non sono rilevabili dai tradizionali dispositivi di protezione e portano facilmente a malfunzionamenti, interruzioni del circuito e incendi. Il guasto serie, come riportato anche nella variante V3:2017 della norma CEI 64-8 [B7], si contrasta generalmente con la manutenzione programmata, ma anche con l'utilizzo di sensori in grado di rilevare gli effetti del fenomeno (sensori di fumo, di fiamma, di temperatura, ecc.). Per i circuiti a 230 Vac, quindi nel nostro caso solo per quelli posti a monte degli alimentatori in bassissima tensione di sicurezza a 24 Vdc, si ritiene interessante valutare, oltre agli accorgimenti sopra descritti, anche l'utilizzo di rilevatori d'arco, ovvero dei cosiddetti AFDD (Arc Fault Detection Device). Questi dispositivi sono in grado di rilevare la presenza di archi elettrici lungo il circuito e quindi di rilevare precocemente il formarsi di un guasto serie, nel caso questo sia interessato (come spesso accade) da fenomeni d'arco. Purtroppo allo stato attuale questi AFDD, rispondenti alla norma prodotto EN 62606:2013 [B29], non risultano idonei, anzi sono sconsigliati, per proteggere circuiti di sicurezza, in quanto la rilevazione di un potenziale guasto porta automaticamente al distacco dell'alimentazione. Tale azione non è accettabile su circuiti che devono dare la precedenza a continuità e disponibilità del servizio. Durante l'attività di ricerca, nell'intento di risolvere questo problema e consentire in futuro l'utilizzo degli AFDD su circuiti di sicurezza, e in generale sugli impianti elettrici di galleria, sono state studiate

delle modifiche al funzionamento del rilevatore d'arco. In pratica sono stati individuati degli accorgimenti circuitali e funzionali che sostituiscono l'azione di distacco automatico con la segnalazione, anche remota, della presenza di un potenziale guasto d'arco sul circuito interessato, in modo da consentire un intervento ottimizzato delle squadre di manutenzione [E1].

5.6.2 Supercapacitori per l'alimentazione autonoma dei singoli dispositivi BLE

Ed eccoci arrivati ad illustrare brevemente questa piccola innovazione nell'ambito dell'alimentazione dei Beacon; si tratta di un metodo alternativo a quello delle batterie o dei classici accumulatori elettrochimici. In questo caso infatti si prevede l'utilizzo di supercapacitori a livello di ogni singolo Beacon, in grado di fornire al dispositivo BLE una fonte energetica di backup, nel caso l'alimentazione esterna non sia disponibile.

In pratica, in caso di perdita dell'alimentazione esterna, il componente di accumulo dovrà consentire il corretto funzionamento del Beacon per un tempo sufficiente a coprire la durata dell'emergenza in galleria; generalmente 2-3 ore possono essere considerate idonee a tale funzione, ma come vedremo risulta relativamente semplice ed economicamente sostenibile garantire tempi di funzionamento decisamente più lunghi.

Un supercapacitore o supercondensatore è un componente elettronico esternamente simile ai condensatori elettrolitici tradizionali, ma con caratteristiche costruttive particolari che lo rendono in grado di accumulare una quantità di carica elettrica estremamente maggiore. Infatti, a parità di dimensioni, si passa da capacità dell'ordine dei mF per i condensatori elettrolitici tradizionali, a qualche migliaio di Farad per i supercondensatori. Queste caratteristiche vengono ottenute sfruttando diverse tecnologie costruttive, ma generalmente l'obiettivo viene raggiunto attraverso la realizzazione di elettrodi di elevatissima superficie, posti a distanze di scala molecolare; si ricorda infatti che la capacità è legata direttamente all'area elettrodica e inversamente alla distanza tra gli elettrodi, come si evince da una delle più semplici relazioni teoriche, ovvero quella relativa ad un condensatore piano a facce parallele:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A_e}{d} \quad (5.1)$$

dove:

C è la capacità in Farad

A_e è la superficie elettrodica in m^2

d è la distanza tra gli elettrodi in m

ε_0 è la permittività dielettrica nel vuoto = $8.85E-12$ [F/m]

ε_r è la costante dielettrica relativa alla sostanza inserita tra i piatti ($\varepsilon_r = 1$ nel vuoto e

$\varepsilon_r > 1$ con dielettrico)

Occorre precisare che l'esigenza di spingersi a distanze tra gli elettrodi estremamente piccole, rappresenta un limite al riguardo della massima differenza di potenziale sopportabile dal componente. La tensione nominale di un singolo elemento supercapacitore si aggira infatti intorno a pochi volt, ad esempio nel nostro test sono stati utilizzati componenti da 2.7 V.

I supercondensatori vengono realizzati sfruttando diversi materiali e tecniche costruttive, sia in merito agli elettrodi che all'elettrolita. Il tipico supercondensatore è basato sul principio del doppio strato elettrico (EDLC - Electrical Double Layer Capacitor), come illustrato in figura 5.67.

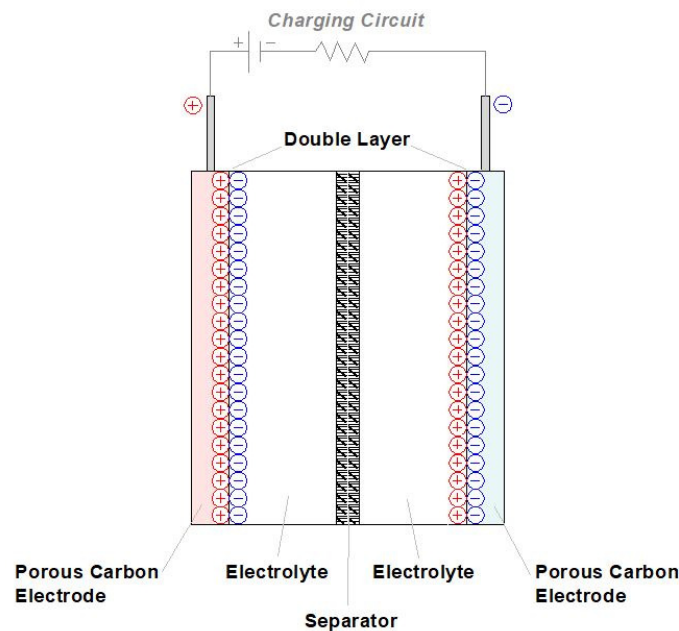


Figura 5.67: schema di principio di un supercapacitore a doppio strato

Gli elettrodi sono generalmente in alluminio rivestito da materiali a base di carbone, mentre l'elettrolita può essere in soluzione acquosa oppure organica. Per aumentare la superficie di scambio il rivestimento degli elettrodi risulta fondamentale, ad esempio sono molto utilizzate le nano strutture di carbonio, le quali, grazie alla grande porosità, consentono di ottenere elevate superfici attive con piccole quantità di materiale.

Anche l'elettrolita risulta di primaria importanza, in quanto la tensione, la capacità nominale e la durata del supercapacitore sono legate anche alle caratteristiche del dielettrico. Ad esempio gli elettroliti acquosi consentono di ottenere una bassa resistenza serie equivalente (ESR) e quindi densità di potenza più elevate rispetto a quelle ottenibili con elettroliti organici, ma questi ultimi permettono di raggiungere tensioni operative maggiori. Pertanto sarebbe opportuno individuare l'elettrolita più idoneo all'applicazione specifica, anche se generalmente risultano sufficienti soluzioni di compromesso. Per quanto riguarda il separatore si tratta di un elemento che deve consentire il transito degli ioni tra le due zone dell'elettrolita, limitando però l'instaurarsi di una corrente tra i due elettrodi, la quale causerebbe una veloce perdita della carica accumulata. Generalmente si hanno separatori in fibra di cellulosa o in fibra di vetro, a seconda delle caratteristiche dell'elettrolita utilizzato.

Si è ritenuto doveroso riportare alcuni aspetti di carattere generale del supercapacitore, al fine di introdurre brevemente il componente e quindi illustrare la soluzione individuata per alimentare i nostri Beacon di galleria. Per ulteriori approfondimenti in materia si rimanda alla vasta letteratura specifica; in bibliografia, a titolo di esempio, si riportano due interessanti review [E7][E8].

Oggi questi interessanti componenti, a seconda della taglia e delle caratteristiche costruttive, vengono utilizzati in numerosi ambiti connessi con l'accumulo di energia, tra cui l'alimentazione di backup di breve durata, il supporto all'avviamento di apparecchiature elettriche e il recupero energetico in genere. I supercapacitori consentono di ottenere elevati valori di densità di potenza, ma rispetto alle tradizionali batterie e accumulatori l'energia immagazzinata risulta ancora bassa. Ciò nonostante, grazie alle piccole correnti assorbite da un Beacon, è possibile sfruttarli per alimentare in backup il dispositivo BLE per un periodo di tempo ampiamente sufficiente a coprire la durata di una tipica condizione di emergenza in galleria. I Beacon BLE infatti necessitano di correnti di alimentazione molto basse, ad esempio il nostro BlueBeacon

Forte, impostato ad una potenza di 0 dBm, durante la breve trasmissione del pacchetto dati iBeacon assorbe una corrente media di circa 8 mA, a fronte di circa 3 μ A nei periodi di riposo tra una trasmissione e l'altra. La corrente richiesta durante la trasmissione, già di per se molto piccola, interessa brevissimi periodi impulsivi dell'ordine di 2-3 ms, mentre il periodo di standby tra gli impulsi può raggiungere i 100 ms (tale valore è il più breve Advertising Interval impostabile con il Beacon utilizzato). La figura 5.68 riporta due esempi delle numerose misure strumentali eseguite su un BlueBeacon Forte con l'utilizzo di un oscilloscopio digitale Tektronix TDS 2014C. In particolare le forme d'onda di figura, ottenute misurando la caduta di tensione ai capi di un apposito resistore, hanno consentito di stimare sia la corrente assorbita che la durata dell'impulso di trasmissione in relazione al tempo di riposo. L'immagine di sinistra raffigura 3 impulsi di trasmissione, mentre quella di destra è un dettaglio di un impulso.

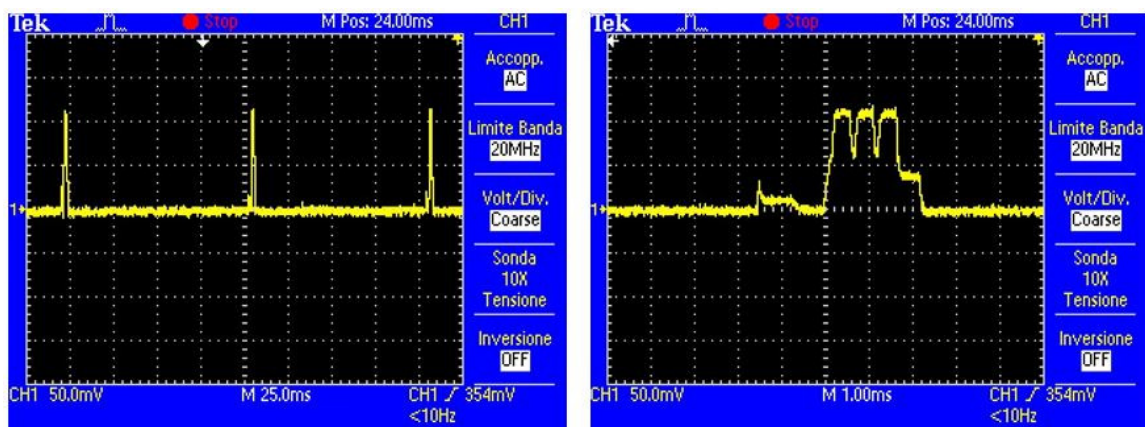


Figura 5.68: forme d'onda rilevate durante la trasmissione di un BlueBeacon Forte (formato dati iBeacon, power tx 0 dBm e advertising interval 100 ms)

L'impulso a 8 mA occupa circa il 3% del periodo dell'onda in esame. Stimando il fabbisogno energetico nel tempo in virtù del breve impulso di trasmissione si otterrebbero valori di energia molto piccoli, ma al fine di semplificare i calcoli e nel contempo lasciare un significativo margine di sicurezza, si è ritenuto opportuno, in prima battuta, stimare la capacità del supercapacitore considerando una durata dell'impulso decisamente superiore (15% del periodo) ed esprimendo il tutto attraverso una corrente equivalente costante nel tempo. In pratica è stato considerato un assorbimento medio costante di 1.2 mA.

Tale valore risulta cautelativo anche in considerazione di eventuali modesti aumenti di potenza (es. sino a 4 dBm), inoltre consente di tener conto delle inevitabili, se pur

piccole, perdite introdotte dall'elettronica dello stadio per la gestione del supercapacitore stesso.

A questo punto, prima di passare alla stima della capacità necessaria ad alimentare il Beacon, occorre considerare lo schema elettronico individuato per realizzare lo stadio di backup. A tal proposito si riporta in figura 5.69 lo schema del *supercapacitor stage*, identificato precedentemente nello schema a blocchi di figura 5.66.

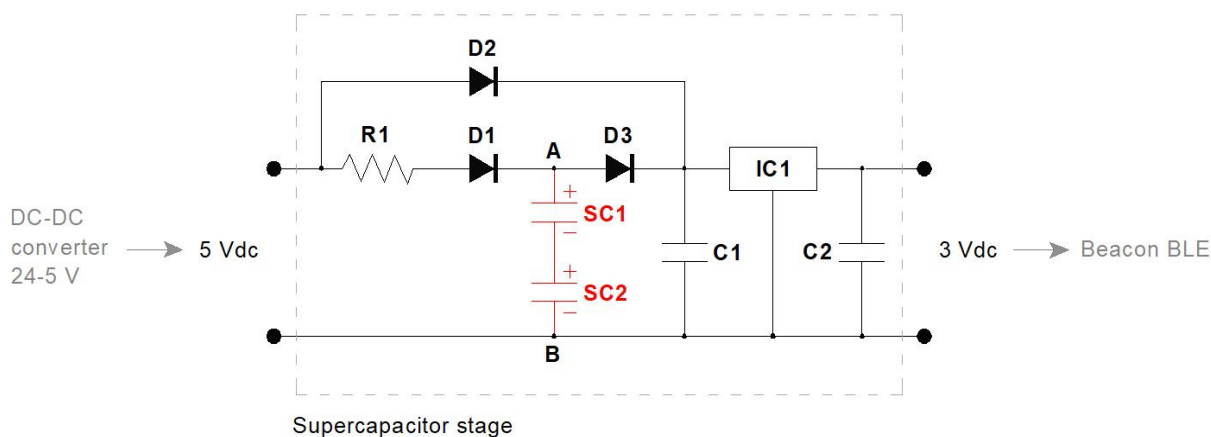


Figura 5.69: stadio per l'alimentazione di backup a supercapacitori

Il circuito di figura 5.69 è stato realizzato per caricare 2 supercapacitori da 2.7 V cadauno (collegati in serie) e per alimentare il Beacon BLE alla sua tensione nominale di 3 Vdc. Di seguito si forniscono i dati sui componenti con una sintetica descrizione della funzione svolta:

- **R1** - resistore da 15 Ω , 2 W - per limitare la corrente di spunto che si instaura a supercapacitori scarichi nei primi istanti di carica (*inrush current limiter*);
- **D1** - diodo Schottky 40V, 1A - per impedire che i supercapacitori si possano scaricare sulla rete in assenza di alimentazione;
- **D2 e D3** - diodi Schottky 40V, 1A - bypass e non ritorno, per consentire al Beacon di funzionare immediatamente non appena l'alimentazione esterna risulta disponibile, senza la necessità di dover attendere la carica dei supercapacitori;
- **C1 e C2** - capacitori ceramici da 1 μF - per abbattere i disturbi e stabilizzare il funzionamento di IC1;
- **IC1** - regolatore di tensione MCP1702 (out 3 Vdc) - per non superare la tensione nominale di 3 Vdc ai capi del Beacon;

- **SC1 e SC2** - supercapacitori a doppio strato (EDLC) da 20 F*, 2.7 V - per fornire l'alimentazione al Beacon (3 h) in caso di perdita dell'alimentazione esterna.

* come da stime seguenti.

Si premette che il circuito di figura 5.69, realizzato per eseguire le prove sperimentali in laboratorio, seppur funzionale e affidabile, rappresenta principalmente una configurazione circuitale di test che ci ha consentito un miglior controllo strumentale delle grandezze elettriche in gioco. Nell'ambito di sviluppi e perfezionamenti futuri, si ritiene opportuno valutare l'utilizzo di circuiti integrati appositamente studiati per la gestione della carica e del bilanciamento dei due supercapacitori, avendo naturalmente cura di stimare l'affidabilità di funzionamento di una componentistica a più elevata integrazione. Con il perfezionamento del circuito si ritiene inoltre opportuno prevedere una migliore gestione della corrente di ricarica dei supercapacitori, in modo da limitare lo spunto iniziale. Così facendo sarà possibile contenere la sezione dei cavi delle dorsali a 24 Vdc, le quali risultano interessate dalla corrente di alimentazione relativa ad un elevato numero di Beacon.

Non ritenendo necessario, per gli scopi del presente elaborato, descrivere nel dettaglio il funzionamento elettronico del circuito di figura 5.69, si ritiene sufficiente riportare solo alcuni aspetti di interesse sul principio di funzionamento. Premesso che in presenza di alimentazione esterna il Beacon risulta immediatamente funzionante (grazie alla presenza del diodo di bypass D2), dopo circa 3 minuti di carica il backup a supercapacitori si può già considerare disponibile, mentre una carica pressoché completa si raggiunge dopo circa 30 minuti.

In questo modo, in caso venga a mancare l'alimentazione esterna, sarà possibile sfruttare l'energia accumulata per alimentare il dispositivo BLE. In condizioni di alimentazione autonoma, quindi durante la scarica dei supercapacitori, il Beacon sarà correttamente alimentato alla tensione nominale di 3 Vdc, sino a quando la tensione di 4.8 V ai capi della serie SC1-SC2 non raggiunge la soglia di 3.2 V. L'intervallo di tensione utile, ottenuto grazie alle piccole correnti in gioco e alle basse cadute di tensione della componentistica utilizzata, è quindi stimabile in 1.6 V, ovvero in quasi tutto l'intero salto tra la tensione di ingresso e quella di uscita dello stadio.

Tale ΔV rappresenta un dato d'ingresso, insieme alla corrente e al tempo di funzionamento desiderato, per poter calcolare il valore della capacità da inserire tra i nodi A e B indicati nello schema di figura 5.69. Per il calcolo si può utilizzare una tipica relazione, nota per stime approssimate di questo tipo [F10]:

$$C [F] = \frac{I[A] \cdot t[s]}{\Delta V[V]} = \frac{0.0012[A] \cdot 10800[s]}{1.6 [V]} = 8.1 \text{ Farad} \quad (5.2)$$

Tenendo conto delle caratteristiche di tensione nominale offerte da questi componenti, si è ritenuto opportuno utilizzare 2 supercapacitori in serie da 2.7 V cadauno, al fine di poter operare correttamente con una tensione di carica prossima ai 5 Vdc. Naturalmente nel collegamento serie si è dovuto considerare la capacità equivalente relativa a tale configurazione (C_s):

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (5.3)$$

In pratica per ottenere 8.1 F sono necessari 2 capacitori in serie da 16.2 F cadauno. Giunti però alla disponibilità commerciale la scelta è caduta su due supercapacitori a doppio strato da 20 F cadauno (figura 5.70), appartenenti alla serie 220 EDLC prodotta dal colosso Vishay [F10]. Quindi la capacità equivalente utilizzata nel test (inserita tra i nodi A e B di figura 5.69) è stata di 10 Farad.

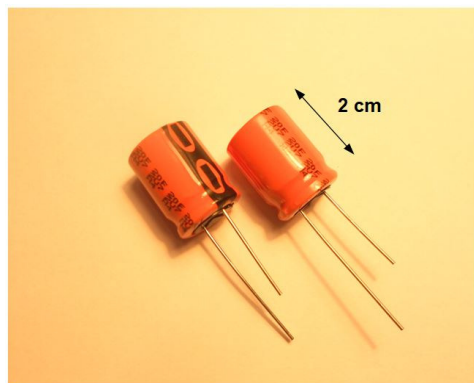


Figura 5.70: supercapacitori Vishay da 20 F, 2.7 V, serie 220 EDLC [F10]

La tabella 5.5, elaborata secondo quanto indicato nel datasheet del produttore, riporta alcuni dati interessanti per l'applicazione in galleria; in particolare si evidenzia la stima

sulla vita utile (superiore a 10 anni, nell'utilizzo a 20 °C) e il numero di cicli di carica-scarica (superiore a 500000).

Quick Reference Data	
Description	Value
Nominal case sizes ($\varnothing$ D x L in mm)	16 x 20
Rated capacitance, C_R	20 F
Rated voltage, U_R (65 °C / 85 °C)	2.7 V / 2.3 V
Category temperature range	-40 °C to +85 °C
Endurance test at 85 °C	1000 h
Useful life at 85 °C	1000 h
Useful life at 20 °C	> 10 years
Shelf life at 20 °C	2 years
Cycle life	> 500000 cycles

Tabella 5.5: alcuni dati relativi al supercapacitore da 20 F utilizzato, serie Vishay 220 EDLC [F10]

Per verificare direttamente su un Beacon BLE la bontà e la durata dell'alimentazione a supercapacitori, si è ritenuto opportuno eseguire dei test sperimentali su alcuni BlueBeacon Forte, precedentemente utilizzati in galleria con la classica alimentazione a batteria. Le prove hanno naturalmente richiesto la realizzazione in laboratorio del circuito illustrato nella precedente figura 5.69. Di seguito invece si riportano due fotografie (figura 5.71) relative ad una fase del test, dove si può notare lo stadio a supercapacitori connesso al Beacon BLE e la strumentazione di misura utilizzata.

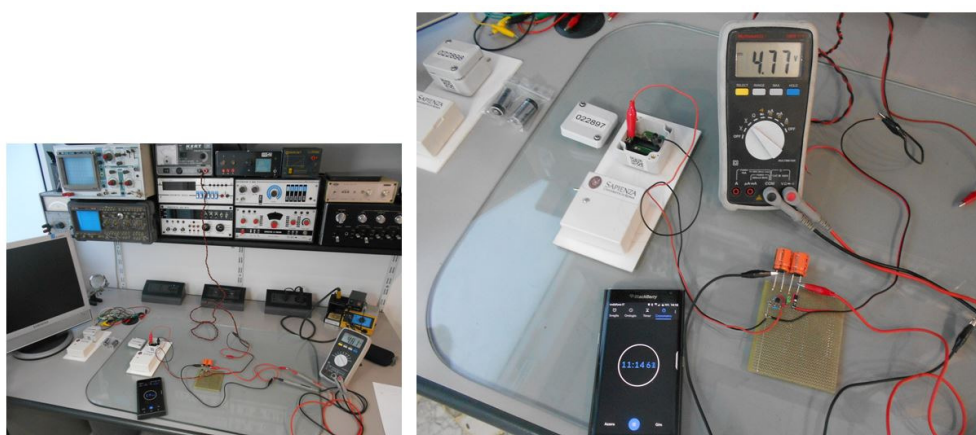


Figura 5.71: fase test alimentazione BlueBeacon Forte con supercapacitori Vishay serie 220 EDLC

In particolare nella fotografia di destra si può notare la tensione di 4.77 Vdc presente a livello dei supercapacitori dopo circa 11 minuti di scarica sul Beacon BLE.

Per le prime tre ore, ad intervalli regolari, è stata misurata la tensione ai capi della serie dei supercapacitori; di seguito (figura 5.72) si riporta la porzione della curva di scarica rilevata.

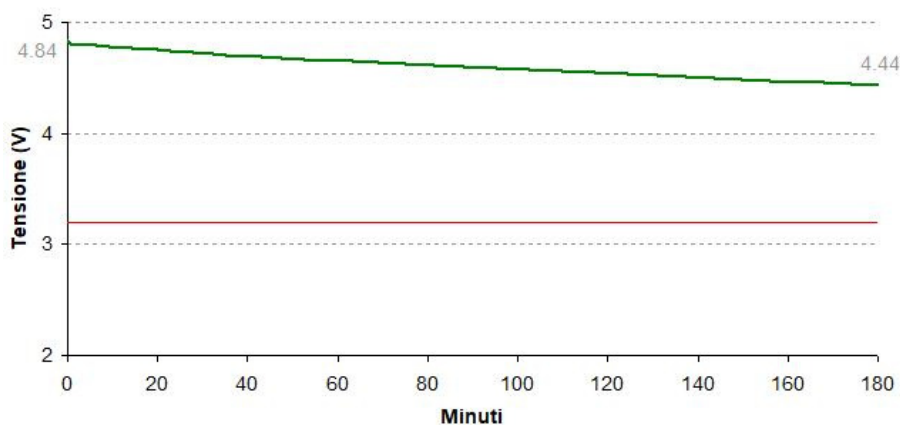


Figura 5.72: curva di scarica supercapacitori (capacità equivalente 10 F) durante l'alimentazione del BlueBeacon Forte

Come si può osservare dalla figura 5.72, dopo 3 ore di regolare funzionamento del Beacon, la tensione ai capi dei supercapacitori era ancora di 4.44 V, ben lontana dalla soglia di 3.2 V individuata come valore minimo per fornire al dispositivo BLE la corretta alimentazione. Come prevedibile dall'andamento della scarica il Beacon ha continuato a funzionare correttamente per quasi 13 ore (767 minuti).

Si tratta di un risultato più che soddisfacente, ma comunque atteso, in considerazione della sovrastima iniziale sulla corrente equivalente assorbita dal Beacon. In pratica per un funzionamento di 3 ore, con i valori di trasmissione impostati nel test, sarebbe stato sufficiente utilizzare due supercapacitori da 5 F cadauno. Si ritiene che tali margini di sicurezza, visto l'ormai basso costo dei supercapacitori, possano essere tranquillamente mantenuti. A tal proposito si fa osservare che il costo dei supercapacitori utilizzati nel test si aggira intorno ai 2 Euro cadauno, inoltre occorre considerare che tale costo è relativo all'acquisto di due soli pezzi da parte di un acquirente privato. Mentre i restanti componenti del circuito di carica hanno un costo complessivo trascurabile, dell'ordine di 1 Euro. In pratica il costo del circuito a supercondensatori si può considerare, più o meno, compensato dal costo risparmiato con l'eliminazione di un accumulatore tradizionale. A questo bilancio occorre poi considerare i numerosi vantaggi offerti dal

sistema a supercapacitore in termini di riduzione della manutenzione e di impatto ambientale.

5.7 Conclusioni e sviluppi futuri

Come si è visto, il presente progetto di ricerca si è concentrato sullo sviluppo di un sistema di indoor positioning (IPS) ottimizzato per le gallerie stradali, in particolare per supportare l'autosoccorso dell'utente che deve abbandonare a piedi l'infrastruttura, sia in condizioni ordinarie che durante l'esodo di emergenza.

L'individuazione di un sistema di localizzazione basato sui Beacon BLE, nonostante tale tecnologia di positioning sia ancora in via di sviluppo, si è dimostrata interessante sin dalle prime fasi di studio, in particolare per l'indipendenza funzionale e per il basso costo di questi innovativi dispositivi, nonché per la semplicità di poter adattare l'architettura del sistema a radio frequenza alla geometria di galleria. In seguito, grazie all'approccio multidisciplinare e all'intensa attività sperimentale in galleria, è stato possibile individuare soluzioni e accorgimenti atti a ridurre le criticità legate al particolare ambiente e alla propagazione dei segnali radio. L'incremento dell'affidabilità e lo sviluppo di specifiche funzioni di supporto all'esodo hanno consentito di ottenere un sistema dalle caratteristiche particolarmente interessanti per l'utilizzo nelle gallerie stradali.

In considerazione dei soddisfacenti risultati sperimentali e del livello di dettaglio raggiunto nello sviluppo del progetto, si ritiene possibile passare, con minimi sforzi, ad uno stadio sperimentale superiore, ovvero all'installazione di un sistema pilota in una tipica galleria autostradale. Tali ulteriori sperimentazioni risultano indispensabili per poter ambire al trasferimento tecnologico del progetto, saranno infatti necessari approfondimenti e valutazioni sul comportamento del sistema in condizioni reali di galleria, con particolare riguardo alle criticità individuate e non completamente analizzate a causa dei limiti imposti dalle risorse disponibili. Inoltre, per poter valutare le funzionalità più avanzate, ovvero quelle previste per il livello di prestazione II, sarà necessario apportare alcune modifiche hardware e software ai dispositivi BLE.

Oltre al perfezionamento del sistema per il supporto all'esodo, si ritiene molto interessante proseguire nello sviluppo delle altre applicazioni individuate, in particolare nell'ambito del supporto alle squadre di soccorso e alla gestione della manutenzione di

galleria. Rappresenta inoltre un'interessante innovazione anche il sistema a supercapacitori per l'alimentazione di backup dei dispositivi BLE, descritto brevemente nelle ultime pagine del presente elaborato. Tale sistema, da verificare con ulteriori sperimentazioni, consentirebbe infatti di ottenere un'elevata disponibilità dell'alimentazione a livello di ogni singolo Beacon, senza la necessità di dover utilizzare i tradizionali accumulatori elettrochimici, quindi con concreti vantaggi in termini di manutenzione e impatto ambientale.

Auspiciando di aver portato un contributo alla riduzione del rischio in galleria, si ringraziano tutti coloro che hanno preso parte alla presente ricerca.

Disclaimer: tutti i marchi, loghi e nomi di prodotti commerciali riportati nel presente elaborato sono di proprietà dei rispettivi titolari e sono stati utilizzati a puro scopo esplicativo, senza alcun fine di violazione dei diritti vigenti di proprietà o di copyright.

6.0 Bibliografia

Sezione A: legislazione

- [A1] - Directive 2014/30/UE - The Electromagnetic Compatibility (EMC).
- [A2] - Directive 2014/35/EU - Harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of electrical equipment designed for use within certain voltage limits.
- [A3] - Directive 2013/35/EU - Minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields).
- [A4] - Directive 2008/96/EC - Road infrastructure safety management (Implemented in Italy with D. Lgs. 35/2011).
- [A5] - Directive 2004/54/EC - Minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network (Implemented in Italy with D. Lgs. 264/2006).
- [A6] - D.P.R. 151/2011 - Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione incendi.
- [A7] - European Recommendation 1999/519/EC of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz).
- [A8] - Ministero delle Infrastrutture e Trasporti - Decreto 2 maggio 2012 - Linee guida per la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali ai sensi dell'articolo 8 del Decreto Legislativo 15 marzo 2011, n. 35.
- [A9] - Regulation UE 305/2011 - Construction Products Regulation, or CPR (Implemented in Italy with D. Lgs. 106/2017).

Sezione B: norme tecniche

- [B1] - ANAS S.p.A. 2009 - Linee guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali.
- [B2] - CEI 0-10:2002 - Guida alla manutenzione degli impianti elettrici utilizzatori.
- [B3] - CEI 20-36;Ab:2011 - Prove di resistenza al fuoco per cavi elettrici in condizioni di incendio - Integrità del circuito.
- [B4] - CEI 64-8:2012 (rif. europeo CENELEC: HD 60364) - Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua.

- [B5] - CEI 64-8;V1:2013 - Variante V1:2013 - Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua.
- [B6] - CEI 64-8;V2:2015 - Variante V2:2015 - Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua
- [B7] - CEI 64-8;V3:2017 - Variante V3:2017 - Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua.
- [B8] - CEI 64-8;V4:2017 - Variante V4:2017 - Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua.
- [B9] - CEI 64-20:2015 - Impianti elettrici nelle gallerie stradali.
- [B10] - CEI EN 50575:2015 e CEI EN 50575;EC1:2016 - Cavi per energia, controllo e comunicazioni - Cavi per applicazioni generali nei lavori di costruzione soggetti a prescrizioni di resistenza all'incendio.
- [B11] - CEI EN 61000 dal 1997 al 2016 - Compatibilità elettromagnetica (EMC).
- [B12] - CEI UNEL 35016:2016 - Classe di Reazione al fuoco dei cavi in relazione al Regolamento EU "Prodotti da Costruzione" (305/2011).
- [B13] - EN 31010:2010 - Risk management - Risk assessment techniques.
- [B14] - EN 50200:2015 - Method of test for resistance to fire of unprotected small cables for use in emergency circuits.
- [B15] - EN 50267:1998 - Common test methods for cables under fire conditions - Test on gases evolved during combustion of materials from cable.
- [B16] - EN 50362:2003 - Method of test for resistance to fire of larger unprotected power and control cables for use in emergency circuits.
- [B17] - EN 60065:2014 - Audio, video and similar electronic apparatus - Safety requirements.
- [B18] - EN 60332:2004 - Test on electric and optical fibre cables under fire conditions.
- [B19] - EN 60300 (all parts: 2005-2018) - Dependability management.
- [B20] - EN 60950:2006 - Information technology equipment - Safety.
- [B21] - EN 61025:2007 - Fault tree analysis (FTA).
- [B22] - EN 61158:2014 - Industrial communication networks - Fieldbus specifications.
- [B23] - EN 61508:2010 - Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems.

- [B24] - EN 61703:2016 - Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms.
- [B25] - EN 61709:2017 - Electric components - Reliability - Reference conditions for failure rates and stress models for conversion.
- [B26] - EN 62311:2008 - Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic field (0 Hz – 300 GHz).
- [B27] - EN 62502:2010 - Analysis techniques for dependability - Event Tree Analysis (ETA).
- [B28] - EN 62508:2010 - Guidance on human aspects of dependability.
- [B29] - EN 62606:2013 - General requirements for arc fault detection devices.
- [B30] - EN IEC 60812:2018 - Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA).
- [B31] IEC 61882:2016 - Hazard and operability studies (HAZOP studies) - Application guide.
- [B32] - IEC TR 62380:2004 - Reliability data handbook. Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment.
- [B33] - UNI EN 15341:2007 - Manutenzione - Indicatori di prestazione della manutenzione (KPI).
- [B34] - UNI EN 16276:2013 - Illuminazione di evacuazione nelle gallerie stradali.
- [B35] - UNI 11095:2011 - Luce e illuminazione - Illuminazione delle gallerie stradali.
- [B36] - UNI 11414:2011 - Manutenzione - Linee guida per la qualificazione del sistema di manutenzione.

Sezione C: affidabilità, valutazione del rischio e comportamento umano

- [C1] - Chatzimichailidou, MM., & Dokas, IM. (2016). RiskSOAP: Introducing and applying a methodology of risk self-awareness in road tunnel safety. Accident Analysis and Prevention, 90, 118-127.
- [C2] - Domenichini, L., & Caputo, F. J. (2016 - 2° Edizione). Sicurezza in galleria - analisi, progetto e verifica della sicurezza della circolazione nelle gallerie stradali. Egaf edizioni S.r.l., ISBN: 978-88-8482-657-2

- [C3] - Guarascio, M., Lombardi, M., Rossi G., & Sciarra, G. (2009). Risk analysis and reliability based design in tunnel fire safety. *WIT Transactions on The Built Environment*, 108, 575-584.
- [C4] - Guarascio, M., Lombardi, M., Rossi, G., & Sciarra, G. (2008). Risk analysis of road and rail tunnels for integral design. *HE in structural engineering - Facoltà di Ingegneria*, Università di Roma La Sapienza.
- [C5] - Helbing, D., Farkas, I., & Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803), 487.
- [C6] - Kazaras, K., & Kirytopoulos, K. (2014). Challenges for current quantitative risk assessment (QRA) models to describe explicitly the road tunnel safety level. *Journal of Risk Research*, 17(8), 953-968.
- [C7] - Kinateder, M., Pauli, P., Müller, M., Krieger, J., Heimbecher, F., Rönna, I., ... & Mühlberger, A. (2013). Human behaviour in severe tunnel accidents: Effects of information and behavioural training. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 17, 20-32.
- [C8] - Kirytopoulos, K., Konstandinidou, M., Nivolianitou, Z., & Kazaras, K. (2014). Embedding the human factor in road tunnel risk analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(4), 329-337.
- [C9] - Leach, J. (2004). Why people 'freeze' in an emergency: temporal and cognitive constraints on survival responses. *Aviation, space, and environmental medicine*, 75(6), 539-542.
- [C10] - Lombardi, M., and Rossi, G. (2015). Fire Protection of emergency electrical devices: Effect on the level of risk— a case study of a rail tunnel. *WIT Transactions on The Built Environment*, 151: 73-83.
- [C11] - Marsella, S., and Sciarretta, N. (2016). Usi innovativi degli strumenti di simulazione dell'esodo.
- [C12] - Ronchi, E., Colonna, P., & Berloco, N. (2013). Reviewing Italian fire safety codes for the analysis of road tunnel evacuations: advantages and limitations of using evacuation models. *Safety science*, 52, 28-36.
- [C13] - Rossi, G., Lombardi, M., & Di Mascio, P. (2018). Consistency and stability of risk indicators: the case of road infrastructures. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 8(1), 39-47.

[C14] - Schwarz, E., Jones, J., and Sateesh, K. (1997). Reliability prediction techniques for commercial components. International workshop on electronic components for the commercialisation of military and space systems, San Diego, pp 1-5.

Sezione D: localizzazione e navigazione in ambienti chiusi

[D1] - Al-Ammar, M. A., Alhadhrami, S., Al-Salman, A., Alarifi, A., Al-Khalifa, H. S., Alnafessah, A., & Alsaleh, M. (2014). Comparative survey of indoor positioning technologies, techniques, and algorithms. In 2014 International Conference on Cyberworlds (pp. 245-252). IEEE.

[D2] - Baek, J., Choi, Y., Lee, C., Suh, J., & Lee, S. (2017). BBUNS: Bluetooth beacon-based underground navigation system to support mine haulage operations. *Minerals*, 7(11), 228.

[D3] - Castillo-Caraa, M., Huaranga-Juncoa, E., Mondragón-Ruiza, G., Salazarb, A., Barbosac, L. O., & Antúnezc, E. A. (2016). Ray: Smart indoor/outdoor routes for the blind using Bluetooth 4.0 BLE. *Procedia Computer Science*, 83, 690-694.

[D4] - Deepesh, P. C., Rath, R., Tiwary, A., Rao, V. N., & Kanakalata, N. (2016, February). Experiences with using iBeacons for Indoor Positioning. In *Proceedings of the 9th India Software Engineering Conference* (pp. 184-189). ACM.

[D5] - Faragher, R., & Harle, R. (2014). An analysis of the accuracy of bluetooth low energy for indoor positioning applications. In *Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014)* (Vol. 812).

[D6] - Han, G., Choi, D., & Lim, W. (2007). A novel reference node selection algorithm based on trilateration for indoor sensor networks. In *7th IEEE International Conference on Computer and Information Technology (CIT 2007)* (pp. 1003-1008). IEEE.

[D7] - Ji, M., Kim, J., Jeon, J., & Cho, Y. (2015). Analysis of positioning accuracy corresponding to the number of BLE beacons in indoor positioning system. In *2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)* (pp. 92-95). IEEE.

[D8] - Kaczmarek, M., Ruminski, J., & Bujnowski, A. (2016). Accuracy analysis of the RSSI BLE SensorTag signal for indoor localization purposes. In *2016 Federated*

Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS) (pp. 1413-1416). IEEE.

[D9] - La Delfa, G. C., Monteleone, S., Catania, V., De Paz, J. F., & Bajo, J. (2016). Performance analysis of visual markers for indoor navigation systems. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 17(8), 730-740.

[D10] - Liu, C., Wu, K., & He, T. (2004). Sensor localization with ring overlapping based on comparison of received signal strength indicator. In *2004 IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (IEEE Cat. No. 04EX975)* (pp. 516-518). IEEE.

[D11] - Ma, Z., Poslad, S., Bigham, J., Zhang, X., & Men, L. (2017). A BLE RSSI ranking based indoor positioning system for generic smartphones. In *2017 Wireless Telecommunications Symposium (WTS)* (pp. 1-8). IEEE.

[D12] - Mautz, R. (2012). Indoor positioning technologies.

[D13] - Patwari, N., O'Dea, R. J., & Wang, Y. (2001). Relative location in wireless networks. In *IEEE VTS 53rd Vehicular Technology Conference*, Spring 2001. *Proceedings (Cat. No. 01CH37202)* (Vol. 2, pp. 1149-1153). IEEE.

[D14] - Savvides, A., Park, H., & Srivastava, M. B. (2002). The bits and flops of the n-hop multilateration primitive for node localization problems. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications* (pp. 112-121). ACM.

[D15] - Seybold, J. S. (2005). *Introduction to RF propagation*. John Wiley & Sons.

[D16] - Song, X., Li, X., Tang, W., Zhang, W., & Li, B. (2014). A hybrid positioning strategy for vehicles in a tunnel based on RFID and in-vehicle sensors. *Sensors*, 14(12), 23095-23118.

[D17] - Thaljaoui, A., Val, T., Nasri, N., & Brulin, D. (2015). BLE localization using RSSI measurements and iRingLA. In *2015 IEEE international conference on industrial technology (ICIT)* (pp. 2178-2183). IEEE.

[D18] - University Of Newcastle. (2009-2012). *Save Me (System and actions for vehicles and transportation hubs to support disaster mitigation and evacuation)*, University of Newcastle Upon Tyne, United Kingdom, Project reference 234027.

- [D19] - Wilfinger, R., Moder, T., Wieser, M., & Grosswindhager, B. (2016). Indoor position determination using location fingerprinting and vehicle sensor data. In 2016 European Navigation Conference (ENC) (pp. 1-9). IEEE.
- [D20] - Yingying, Guo, Sun, Y., Luo, H., & Guizani, N. (2016). Accurate indoor localization based on crowd sensing. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 16(17), 2852-2868.
- [D21] - Zanca, G., Zorzi, F., Zanella, A., & Zorzi, M. (2008). Experimental comparison of RSSI-based localization algorithms for indoor wireless sensor networks. In *Proceedings of the workshop on Real-world wireless sensor networks* (pp. 1-5). ACM.
- [D22] - Zhang, E., Kuang, Y., Jiang, W., & Umer, M. A. (2011). Active RFID positioning of vehicles in road traffic. In 2011 11th International Symposium on Communications & Information Technologies (ISCIT) (pp. 222-227). IEEE.
- [D23] - Zhu, L., Yang, A., Wu, D., & Liu, L. (2014). Survey of indoor positioning technologies and systems. In *Life System Modeling and Simulation* (pp. 400-409). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [D24] - Zhuang, Y., Yang, J., Li, Y., Qi, L., & El-Sheimy, N. (2016). Smartphone-based indoor localization with bluetooth low energy beacons. *Sensors*, 16(5), 596.
- [D25] - Zou, H., Jiang, H., Luo, Y., Zhu, J., Lu, X., & Xie, L. (2016). BlueDetect: An iBeacon-Enabled Scheme for Accurate and Energy-Efficient Indoor-Outdoor Detection and Seamless Location-Based Service. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 16(2), 268.

Sezione E: altri aspetti di interesse

- [E1] - Fusco, C., Di Mascio, P., Lombardi, M., Rossi, G., Cantisani, G., & Ambrosetti, U. (2019). Immediate detection and management of arc faults in the electric circuits of road tunnels. *GEAM Geoingegneria Ambientale e Mineraria*, (157), 39-46.
- [E2] - Gao, R., Ye, F., Luo, G., & Cong, J. (2018). *Smartphone-Based Indoor Map Construction: Principles and Applications*. Springer.
- [E3] - Gebali, F. (2008). *Analysis of computer and communication networks*. Springer Science & Business Media.

- [E4] - Ghamari, M., Villeneuve, E., Soltanpur, C., Khangosstar, J., Janko, B., Sherratt, R. S., & Harwin, W. (2018). Detailed Examination of a Packet Collision Model for Bluetooth Low Energy Advertising Mode. *IEEE Access*, 6, 46066-46073.
- [E5] - Lindh, J. (2015). Bluetooth® low energy beacons. Texas Instruments, 2.
- [E6] - Munoz Diaz, E., de Ponte Müller, F., & García Domínguez, J. (2017). Use of the magnetic field for improving gyroscopes' biases estimation. *Sensors*, 17(4), 832.
- [E7] - Vangari, M., Pryor, T., & Jiang, L. (2012). Supercapacitors: review of materials and fabrication methods. *Journal of Energy Engineering*, 139(2), 72-79.
- [E8] - Zhong, C., Deng, Y., Hu, W., Qiao, J., Zhang, L., & Zhang, J. (2015). A review of electrolyte materials and compositions for electrochemical supercapacitors. *Chemical Society Reviews*, 44(21), 7484-7539.

Sezione F: fonti web (argomenti diversi)

- [F1] - Alfacod S.r.l. <https://www.alfacod.it> - ultima data di accesso al sito 10/01/2019.
- [F2] - Bluetooth Special Interest Group. <https://www.bluetooth.com> - ultima data di accesso al sito 14/07/2019.
- [F3] - BlueUp S.r.l.s. <https://www.blueupbeacons.com> - ultima data di accesso al sito 16/02/2019.
- [F4] - GiPStech S.r.l. <http://www.gipstech.com> - ultima data di accesso al sito 16/02/2019.
- [F5] - International Tunneling and Underground Space Association. <https://www.ita-aites.org> - ultima data di accesso al sito 28/02/2019.
- [F6] - Keuwlsoft. <http://www.keuwl.com> - ultima data di accesso al sito 02/08/2019.
- [F7] - Nextome S.r.l. <https://www.nextome.net> - ultima data di accesso al sito 16/02/2019.
- [F8] - Quuppa. <https://quuppa.com/> - ultima data di accesso al sito 13/10/2019
- [F9] - University Of Newcastle. (2009-2012). Save Me (System and actions for vehicles and transportation hubs to support disaster mitigation and evacuation), <https://trimis.ec.europa.eu/project/system-and-actions-vehicles-and-transportation-hubs-support-disaster-mitigation-and#tab-technologies> - ultima data di accesso al sito 01/06/2019.

- [F10] - Vishay. Discrete Semiconductors and Electronic Components. <http://www.vishay.com/> - ultima data di accesso al sito 12/10/2019.
- [F11] - VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. <https://www.vttresearch.com/> - http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/fdsevac/documents/FDS+Evac_textbased_homepage.txt - http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/fdsevac/documents/FDS+EVAC_Guide.pdf - ultima data di accesso ai siti e file web 12/10/2019.
- [F12] - Waze Mobile Ltd. <https://www.waze.com/it/beacons> - ultima data di accesso al sito 01/06/2019.
- [F13] - PIARC World Road Association (2011). Road tunnels manual. <https://tunnelsmanual.piarc.org/en> - ultima data di accesso al sito 28/10/2019.
- [F14] - Specifiche formato Eddystone. <https://github.com/google/eddystone> - ultima data di accesso al sito 28/10/2019.
- [F15] - Specifiche formato iBeacon. <https://developer.apple.com/ibeacon/> - ultima data di accesso al sito 28/10/2019.