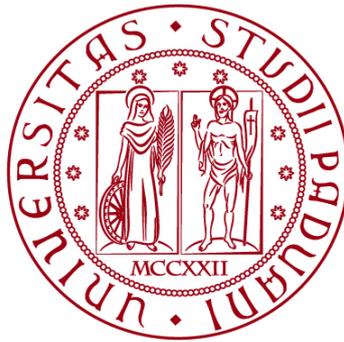


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Edile e Architettura



TESI DI LAUREA

**Sistemi di georeferenziazione indoor tramite tecnologia
Bluetooth: possibili implementazioni BMS e BIM based.**

Relatore: prof. Carlo Zanchetta

**Laureanda: Virginia Andreuzza
1165634**

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

SOMMARIO

ABSTRACT	3
INTRODUZIONE	5
CAPITOLO PRIMO INDUSTRIA 4.0 E I SUOI SVILUPPI NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI	7
1 INDUSTRIA 4.0	7
1.1 Edilizia 4.0	7
1.2 L'Internet of Things	8
1.3 Industry Foundation Classes	16
CAPITOLO SECONDO LA BUILDING AUTOMATION E I SUOI STANDARD	21
1 LA BUILDING AUTOMATION E I BUILDING AUTOMATION SYSTEMS	21
1.1 Sensori, controller e attuatori in un dispositivo di controllo BAS	21
1.2 Modello di un dispositivo BAS	23
1.3 Architettura BAS	25
2 STANDARD PER LA COMUNICAZIONE DEI SISTEMI DI AUTOMAZIONE	27
2.1 BACnet	27
2.2 LonWorks	28
2.3 KNX	30
2.4 ZigBee	33
2.5 Altre tecnologie	36
3 BACNET	44
3.1 Oggetti BACnet	44
3.2 Proprietà oggetti BACnet	46
3.3 Servizi BACnet	49
3.4 Classi di Conformità e Gruppi di Funzioni	52
3.5 PICS	53
CAPITOLO TERZO LA LOCALIZZAZIONE INDOOR E I METODI DI IDENTIFICAZIONE DEI DISPOSITIVI DOMOTICI	57
1 LA LOCALIZZAZIONE INDOOR	57
1.1 Tecniche di localizzazione	58
1.2 Tecnologie di localizzazione	62
1.3 Visible Light Communication (VLC)	63
1.4 Ultra-WideBand (UWB)	64
1.5 Sistemi a radiofrequenza RFID e NFC	66
1.6 Wi-fi	67
1.7 Bluetooth Low Energy (BLE)	68
2 BLUETOOTH LOW ENERGY	70
2.1 Differenze Bluetooth Classic e LE	71
2.2 Architettura BLE	74
2.3 Protocolli BLE: iBeacon ed Eddystone	81
2.4 Dispositivi BLE	83
2.5 Domini applicativi di BLE	84
2.6 Localizzazione indoor tramite Beacon BLE	85
2.7 App smartphone per l'indoor positioning	90
3 I QR CODE E L'IDENTIFICATIVO DI DISPOSITIVI DOMOTICI	96
3.1 Codice a barre e QR code	97

3.2	<i>Applicazioni smartphone per lettura di barcode e QR code</i>	99
3.3	<i>ID BACnet nei QR code dei dispositivi domotici</i>	102
CAPITOLO QUARTO SVILUPPO DI UN'APP SMARTPHONE PER L'ACQUISIZIONE DELL'ID BACNET		109
1	CASO STUDIO APPLICATIVO	109
1.1	<i>Impostazione progetto Revit</i>	112
1.2	<i>Impostazione applicazione smartphone</i>	113
1.3	<i>Applicazione smartphone per acquisizione ID BACnet</i>	116
2	ANALISI CRITICA DEI RISULTATI	124
CAPITOLO QUINTO CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI		126
1	SINTESI DELLA RICERCA	126
2	SVILUPPI FUTURI	127
ALLEGATI		128
ALLEGATO 1 – FORMATO PICS DA COMPILARE FORNITO DA BACNET - ANNEX A – PROTOCOL IMPLEMENTATION CONFORMANCE STATEMENT (NORMATIVE) .		128
BIBLIOGRAFIA		133
INDICE DELLE TABELLE		141
INDICE ICONOGRAFICO		142

ABSTRACT

L'incremento costante dell'utilizzo della tecnologia nel secolo in cui viviamo ha introdotto nuovi metodi di gestione degli edifici nel settore dell'edilizia, mirati all'ottimizzazione dei costi e dei consumi. Il pilastro degli smart building è l'Internet of Things (IoT), che ha reso possibile lo sviluppo di sistemi di automazione degli edifici attraverso il collegamento di dispositivi e sistemi domotici a una piattaforma tecnologica centralizzata nota come BMS.

Un'altra conseguenza dell'IoT nel settore delle costruzioni è il BIM, considerato una strategia di successo per organizzare, archiviare e gestire i metadati statici relativi alla progettazione, costruzione e manutenzione degli edifici. Il BIM consente la creazione di modelli virtuali tridimensionali in grado di simulare l'edificio e di fungere da database per le informazioni riguardanti la rappresentazione architettonica ed ingegneristica, la stima dei tempi e dei costi, la valutazione energetica, i costi di manutenzione e le considerazioni di sostenibilità economica e ambientale.

Tra le esperienze di interconnessione rese possibili dall'IoT, vi è la capacità di localizzare indoor un dispositivo smartphone utilizzando diverse tecnologie. In questo studio, viene dedicato uno spazio all'analisi della letteratura sulle tecnologie di localizzazione indoor e sugli algoritmi correlati, con particolare attenzione al Bluetooth Low Energy, ritenuta la tecnologia più economica e precisa.

L'obiettivo di questa tesi è arricchire i database BIM con informazioni più precise riguardanti l'identificativo ID BACnet dei singoli dispositivi domotici collegati alla centrale BMS. Per identificare l'ID BACnet dei dispositivi domotici, verrà utilizzato un lettore di codici presente in un'applicazione per smartphone sviluppata all'interno di questo studio. Una volta acquisito l'identificativo BACnet, l'applicazione sarà in grado di compilare automaticamente i dati rilevati dal campo nell'omologo digitale di Revit.

The increasing use of technology that characterizes the century we live in has led to new methods of building management in the construction sector, aiming for cost optimization and efficiency. The cornerstone for smart buildings is the Internet of Things (IoT), which has enabled the development of building automation systems through the integration of home automation systems and devices into a centralized technological backbone, commonly known as the BMS (Building Management System).

Another consequence of IoT in the construction industry is Building Information Modeling (BIM), considered a successful strategy for organizing, storing, and managing static metadata related to the design, construction, and maintenance of buildings. BIM allows for the creation of three-dimensional virtual models capable of simulating the building and serving as a database for architectural and engineering representation, time and cost estimation, energy evaluation, maintenance costs, and economic and environmental sustainability considerations.

Among the interconnected experiences enabled by the growing IoT, there is also the ability of a smartphone device to be indoor geolocated through various technologies. This thesis project includes a literature analysis on indoor positioning technologies and their corresponding algorithms. One of the most cost-effective and accurate solutions in this regard is Bluetooth Low Energy.

The objective of this thesis is to enrich BIM databases with more precise information regarding the BACnet ID of individual devices connected to the central BMS. To identify the BACnet ID of home automation devices, a code reader integrated into a smartphone application developed within this study will be used. Once the BACnet ID is acquired, the application will be able to automatically populate the data collected in the field into the corresponding digital representation in Revit.

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, l'evoluzione tecnologica e digitale ha portato a una trasformazione significativa del settore industriale, aprendo la strada a nuovi paradigmi produttivi e organizzativi. Questo fenomeno è noto come Industria 4.0, un termine che indica la quarta rivoluzione industriale.

Industria 4.0 rappresenta un'interconnessione tra i sistemi fisici e digitali, combinando tecnologie avanzate come l'internet delle cose (IoT), l'intelligenza artificiale (IA), la robotica, la stampa 3D e l'analisi dei dati. Queste tecnologie consentono l'automazione dei processi produttivi, la raccolta e l'analisi dei dati in tempo reale, nonché la comunicazione tra macchine, sistemi e operatori umani.

Questa trasformazione è stata guidata dalla necessità di aumentare l'efficienza, la flessibilità e la produttività delle industrie, oltre all'esigenza di ridurre i costi di produzione. Grazie ad Industria 4.0, le fabbriche sono diventate sempre più intelligenti, in grado di adattarsi rapidamente alle esigenze del mercato e di personalizzare la produzione in base alle richieste dei clienti.

Con il tempo, l'approccio di Industria 4.0 si è esteso ad altri settori, tra cui l'edilizia. L'Edilizia 4.0 rappresenta l'applicazione dei principi e delle tecnologie dell'Industria 4.0 al settore delle costruzioni. Questo campo ha tradizionalmente utilizzato metodi di lavoro convenzionali, ma sta sperimentando una trasformazione significativa grazie all'adozione di tecnologie innovative.

L'Edilizia 4.0 mira a migliorare l'efficienza e la sostenibilità delle operazioni edilizie attraverso l'utilizzo di soluzioni digitali. La prefabbricazione, ad esempio, sta diventando sempre più comune, consentendo la realizzazione di componenti strutturali in fabbrica e il loro assemblaggio in cantiere. Ciò consente di ridurre i tempi di costruzione, i costi e i rifiuti generati durante il processo.

Inoltre, l'utilizzo di sensori e dispositivi intelligenti nell'edilizia permette di monitorare e controllare in tempo reale i parametri ambientali, come la temperatura, l'umidità e la qualità dell'aria. Ciò contribuisce a migliorare il comfort degli occupanti e a ridurre i consumi energetici degli edifici. A questo proposito sono stati conati nuovi termini nell'ambito dell'edilizia, sono apparsi i cosiddetti *smart building*. Questi vengono governati da dei sistemi centrali che vengono chiamati Building Management Systems (BMS).

La modellazione delle informazioni di costruzione (BIM) è un'altra tecnologia chiave nell'Edilizia 4.0. Il BIM consente di creare modelli digitali dettagliati degli edifici, che includono informazioni sulla geometria, sui materiali e sulle prestazioni. Questi modelli possono essere utilizzati per analizzare e ottimizzare la progettazione, coordinare le attività di costruzione e

facilitare la manutenzione e la gestione degli edifici nel tempo.

Questo lavoro di tesi esplorerà gli elementi principali di Edilizia 4.0. Nella prima sezione ci si muoverà all'interno del significato pratico di Edilizia 4.0 e verranno sviluppati i temi relativi all'Internet of Things e alla modellazione BIM, in particolare allo standard IFC che ha saputo dare una risposta al problema dell'interoperabilità tra gli attori del processo costruttivo.

Nella seconda sezione invece ci si addenterà nella Building Automation, verranno trattati temi relativi ai sistemi di automazione degli edifici. Si studieranno le componenti principali di un BMS per poi passare all'analisi degli standard più conosciuti per le reti di automazione degli edifici. Tra gli standard verrà approfondito BACnet e si farà particolare attenzione all'identificazione degli oggetti domotici all'interno della rete.

Nella terza sezione si arriverà invece al fulcro degli studi portati avanti durante il percorso di tesi. Verrà approfondita la localizzazione indoor studiando in particolar modo la tecnologia Bluetooth Low Energy e i metodi di implementazione con diversi algoritmi e soluzioni. Un capitolo sarà dedicato all'evoluzione degli smartphone e alla capacità di leggere codici QR code affissi nei terminali domotici all'interno di reti BACnet.

Nella sezione successiva si descriveranno compiutamente la creazione dell'applicazione smartphone BACnet ID. Con questa applicazione verranno rilevati gli identificativi BACnet presenti nelle etichette dei dispositivi domotici. L'identificativo verrà poi compilato in Revit per il dispositivo omologo digitale.

Infine, si analizzeranno i risultati e si proporranno nuovi sviluppi per l'applicazione, primo tra tutti la possibilità di geolocalizzare il dispositivo smartphone appoggiandosi ad una rete di beacon BLE.

Capitolo Primo

INDUSTRIA 4.0 E I SUOI SVILUPPI NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI

1 DIGITALIZZAZIONE, INDUSTRIA 4.0 ED EDILIZIA 4.0

Negli ultimi decenni si è assistito ad una rivoluzione digitale, i processi manuali sono stati sostituiti in larga misura da applicazioni che ha permesso alle aziende industriali del mondo di connettersi e controllare in modo intelligente i loro macchinari e le strutture di stoccaggio attraverso sistemi cyber-fisici (Maskuriy et al., 2019). Nelle cosiddette fabbriche intelligenti, ovvero che lavorano in modo autonomo, si utilizzano tecnologie avanzate e la presenza del lavoratore umano è ridotta alla supervisione dei processi (Peralta-Abarca et al., 2020). Con “Industria 4.0” si intende dunque l’automazione industriale, basata sulla raccolta di dati da tutti i processi in tempo reale, attraverso l’uso di strumenti intelligenti (come sensori o software di raccolta dati) e sistemi di acquisizione che sono responsabili del reperimento, del trasporto e dell’interpretazione di questi dati.

Il primo ruolo centrale nell’Industria 4.0 è occupato dall’*Internet of Things* (IoT), ovvero tutti quegli oggetti fisici con una propria estensione di Internet e con una propria identità digitale capace di comunicare con altri oggetti nella rete.

Il ruolo dei *big data* è invece una conseguenza dell’IoT dal momento che questi sistemi sono progettati per recepire e scambiare informazioni con altri dispositivi. La raccolta e l’analisi dei dati sono visti come basi per la generazione di conoscenze utili per il processo decisionale. Dal momento che i dati generati sono coinvolti nello sviluppo delle attività, è essenziale includerli nel processo decisionale (Peralta-Abarca et al., 2020).

Con il termine Edilizia 4.0 ci si riferisce quindi ad un paradigma ingegneristico e costruttivo derivato dall’Industria 4.0 che promette di rivoluzionare il modo in cui vengono costruiti gli edifici e gestiti i cantieri attraverso l’uso della tecnologia (Noran et al., 2020). Tuttavia, nella pratica, l’Edilizia 4.0 non consiste solamente nell’implementazione di nuove tecnologie, ma implica anche una trasformazione completa e profonda dei processi di gestione dei progetti delle imprese di costruzione attraverso l’uso e lo sfruttamento dei dati raccolti in tempo reale con tecnologie nuove o esistenti a fini decisionali (Perrier et al., 2020). La quarta rivoluzione industriale, pertanto, ha introdotto nel settore AEC¹ tecnologie digitali, sistemi di sensori, macchine e materiali intelligenti e, allo stesso tempo, ha messo la tecnologia al servizio della gestione dell’edificio, che consiste nella percentuale maggiore del costo di vita di un edificio e nel più grande generatore e gestore di dati sugli edifici.

¹ Architecture Engineering Construction.

Lo sviluppo di Edilizia 4.0 è stato permesso dai sistemi cyber-fisici (CPS), ovvero sistemi fisici che sono strettamente connessi con sistemi informatici e che possono interagire e collaborare con altri sistemi cyber-fisici (Gonzato, s.d.), permettendo dunque un coordinamento bidirezionale tra costruzione fisica e modelli virtuali. I sistemi cyber-fisici consentono la collaborazione tra tutti gli stakeholder coinvolti durante il processo di progettazione, costruzione e gestione dell'edificio (Kozlovska et al., 2021).

Il BIM è considerato una forza trainante centrale dell'Edilizia 4.0, dal momento che sta diventando il fulcro della gestione delle informazioni nel settore delle costruzioni; infatti, attraverso i modelli virtuali creati grazie al BIM, le parti coinvolte possono scambiare e gestire le informazioni durante l'intero ciclo di vita di un edificio (Noran et al., 2020). Negli ultimi anni si è assistito ad un aumento dell'utilizzo del BIM poiché risulta efficace per il miglioramento delle prestazioni e dell'efficienza dei progetti di costruzione, oltre che per il controllo della qualità, dei costi e dei tempi di costruzione, andando a supportare il processo decisionale in tempo reale e individuando in anticipo i potenziali rischi per la sicurezza (Perrier et al., 2020).

Un altro elemento importante per il compimento del paradigma Industria 4.0 è il BMS, essenziale per la gestione degli edifici. Un Building Management System è un sistema di controllo e gestione degli edifici, o parti di edifici, che controlla e monitora gli impianti e le apparecchiature meccaniche ed elettriche e offre la possibilità di gestirli, in loco o da remoto, attraverso un'interfaccia unica (Gonzato, s.d.). Si può dire quindi che un BMS sfrutti i progressi apportati dai sistemi cyber-fisici intelligenti per la gestione delle informazioni in tempo reale sullo stato di un edificio durante il suo ciclo di vita (Noran et al., 2020).

2 L'INTERNET OF THINGS

L'Internet delle cose rappresenta una colonna portante per la creazione e lo sviluppo della quarta rivoluzione industriale. Il termine IoT è stato utilizzato inizialmente da Kevin Ashton nel 1999 nell'ambito della gestione della fornitura a catena, ma è diventato di uso comune grazie al lavoro dell'Auto-ID Centre, un gruppo di ricerca che lavora nel campo dell'identificazione in rete a radiofrequenza (RFID) e altre tecnologie di rilevamento (van Kranenburg & Bassi, 2012).

Con IoT ci si riferisce alla stretta connessione tra il mondo fisico e digitale, ed è assimilabile ad un'infrastruttura di rete globale dinamica con capacità di autoconfigurazione basata su protocolli di comunicazione standard e interoperabili in cui gli "oggetti" fisici e virtuali hanno identità e attributi fisici insieme a personalità virtuali, utilizzano interfacce intelligenti e sono perfettamente integrati nella rete informativa (Ray, 2018). L'obiettivo principale dei dispositivi IoT è far sì che un computer percepisca le informazioni senza l'intervento dell'uomo e ciò è possibile proprio grazie a Internet: gli oggetti (Things) interconnessi non solo raccolgono informazioni dall'ambiente e interagiscono con il mondo fisico, ma anche utilizzano standard di Internet esistenti per fornire servizi di trasferimento di informazioni, analisi, applicazione e

comunicazione (Gubbi et al., 2013).

Nonostante l'IIoT si sia diffuso rapidamente e il suo utilizzo sia diventato sempre più quotidiano (la maggior parte di noi porta l'RFID nel portafogli senza nemmeno accorgersi di avere a che fare con un dispositivo IIoT), non si è arrivati ad un'unica definizione. Ciò è dovuto principalmente alla triplice visione che gli studiosi hanno rispetto all'argomento. C'è chi spinge verso una visione dell'IIoT "orientata alle cose" (sensori), chi per una visione "orientata ad Internet" (middleware) e chi per una visione "orientata alla semantica" (conoscenza). Dall'illustrazione seguente (fig. 1.1) appare evidente che il paradigma dell'IIoT sarà il risultato della convergenza delle tre principali visioni sopra citate (Atzori et al., 2010).

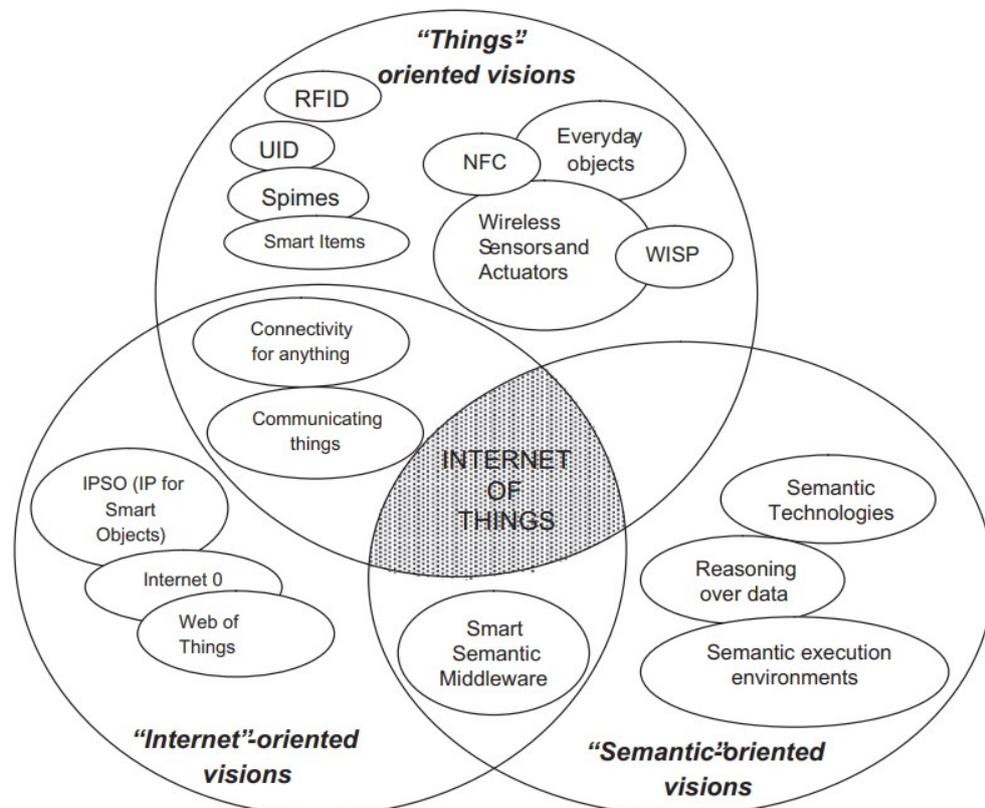


Figura 1.1 Il paradigma dell'IIoT come convergenza delle tre visioni "orientata alle cose", "orientata all'Internet" e "orientata alla semantica". (Atzori et al., 2010)

La prima prospettiva dell'IIoT a nascere è stata quella *orientata alle cose*. I dispositivi IIoT erano molto semplici: tag di identificazione a radiofrequenza RFID. Non a caso il termine IIoT è stato coniato proprio da Auto-ID Labs, una rete mondiale di laboratori di ricerca accademici nel campo della RFID in rete e delle tecnologie di rilevamento emergenti (Atzori et al., 2010). La tecnologia RFID consente di progettare microchip per la comunicazione dei dati wireless. Essi contribuiscono all'identificazione automatica di qualsiasi cosa a cui sono attaccati, agendo come un codice a barre elettronico. Le etichette RFID passive non si alimentano a batteria e

utilizzano l'energia del segnale di interrogazione del lettore per comunicare l'ID al lettore RFID; alcuni esempi di tag passivi possiamo trovarli nelle carte bancarie o utilizzati per i pedaggi stradali. I lettori RFID attivi dispongono invece di una batteria propria e della capacità di comunicare, vengono ampiamente sfruttati nei container portuali per il monitoraggio del carico (Gubbi et al., 2013).

L'IoT, però, non può essere ridotto solamente agli RFID, sono stati proposti altri concetti che avvalorano la visione *orientata alle cose*.

Le Nazioni Unite, durante l'incontro di Tunisi del 2005, hanno previsto una nuova era di ubiquità in cui gli esseri umani potrebbero diventare la minoranza come generatori e ricevitori di traffico di dati e i cambiamenti apportati da Internet saranno inferiori a quelli provocati dalla messa in rete degli oggetti di uso quotidiano (Atzori et al., 2010).

Dall'idea di aumentare l'intelligenza degli oggetti è emerso un nuovo concetto all'interno dell'IoT: lo *spime*, un oggetto che può essere rintracciato attraverso lo spazio e il tempo per tutto il suo ciclo di vita e che sarà sostenibile, migliorabile e identificabile in modo univoco. A livello pratico si tratta di una sorta di sensori non solo dotati delle consuete capacità di comunicazione wireless, di memoria e di elaborazione, ma anche di nuove potenzialità. Conseguentemente allo *spime* la UIT² ha aperto una visione dell'IoT secondo la quale "dalla connettività in qualsiasi momento e in qualsiasi luogo per chiunque, ora avremo la connettività per qualsiasi cosa" (Atzori et al., 2010).

È a questo concetto che si allaccia la visione dell'IoT *orientata a Internet*. Infatti, l'architettura Internet centrica prevede che i servizi Internet siano l'obiettivo principale, mentre i dati vengano forniti dagli oggetti. È proprio grazie alla diffusione di dispositivi abilitati alla tecnologia wireless aperta, come Bluetooth, identificazione a radiofrequenza RFID, Wi-Fi e servizi di dati telefonici, nonché da sensori e attuatori incorporati, che l'IoT è uscita dal suo ambito e si presta a trasformare l'Internet da statico a dinamico, in cui l'interconnessione tra le persone viaggia ad un ritmo senza precedenti (Gubbi et al., 2013). Secondo l'approccio IPSO³ e Internet \emptyset ⁴, l'IoT degli oggetti si diffonderà attraverso una sorta di semplificazione dell'IP attuale per adattarlo a qualsiasi oggetto e renderlo indirizzabile e raggiungibile da qualsiasi luogo.

Infine, la visione *orientata alla semantica* prevede che il numero di oggetti coinvolti nell'IoT sia destinato a diventare estremamente elevato, pertanto, le questioni relative

² La International Telecommunication Union (ITU) è l'agenzia specializzata delle Nazioni Unite per le tecnologie dell'informazione e della comunicazione.

³ L'Internet Protocol for Smart Objects (IPSO) definisce un modello di oggetto, basato sullo standard Open Mobile Alliance (OMA) per l'Internet of Things (IoT), per ottenere l'interoperabilità dei dati trasmessi tra dispositivi e software applicativo. Un insieme comune di definizioni di oggetti consente al software di interagire con qualsiasi dispositivo.

⁴ Con Internet \emptyset si intende l'estensione del principio end-to-end dai computer ai dispositivi.

all'interconnessione, ricerca e organizzazione delle informazioni generate dall'IoT diventeranno impegnative e potrebbero essere svolte da tecnologie semantiche (Atzori et al., 2010).

2.1 L'architettura dell'IoT

Un sistema IoT nel mondo reale è concretizzabile attraverso l'integrazione di diverse tecnologie abilitanti. A seguito vengono discusse le più importanti (Atzori et al., 2010):

- *Tecnologie di identificazione, rilevamento e comunicazione.* Le più utilizzate sono i tag RFID che monitorano gli oggetti in tempo reale trasmettendo un segnale che viene ricevuto da un identificatore univoco.
- *Middleware.* È un livello software o un insieme di sottolivelli interposti tra il livello tecnologico e quello applicativo. La sua caratteristica è di nascondere i dettagli delle diverse tecnologie ed è fondamentale per esonerare il programmatore da questioni non direttamente pertinenti al suo obiettivo.
- *Applicazioni.* Predispongono un'interfaccia con le funzionalità del sistema per l'utente finale.
- *Service Composition:* il suo scopo finale è costruire le applicazioni specifiche e dunque fornisce le funzionalità per la composizione dei singoli servizi offerti in queste.
- *Gestione dei servizi.* Provvede alla gestione dei servizi del sistema IoT.
- *Astrazione degli oggetti.* È un livello dell'IoT capace di armonizzare il recepimento di informazioni nel sistema attraverso un unico linguaggio.
- *Gestione della privacy e della sicurezza.* La privacy e la sicurezza dei dati scambiati è assicurata da una particolare funzione del middleware.

Dal punto di vista degli utenti, un tipico sistema IoT è composto da cinque componenti principali in base al contributo e alla funzione nel sistema IoT:

- *Dispositivi o sensori (terminali):* svolgono attività di rilevamento, attuazione, controllo e monitoraggio. Possono essere di vario tipo, ad esempio, sensori indossabili, orologi intelligenti, luci LED, automobili e macchine industriali.
- *Networks (reti – infrastrutture di comunicazione):* eseguono la comunicazione tra dispositivi e server remoti.
- *Cloud (repository dei dati e infrastruttura di elaborazione dei dati):* ha la funzione di contenere tutti i dati e le informazioni rilevate dai sensori, dalle persone e dagli altri dispositivi.
- *Analytics (algoritmo di calcolo e algoritmo di data mining):* effettua analisi specifiche a partire dai dati rilevati.
- *Attuatori o interfacce utente (servizi):* un sistema IoT serve vari tipi di funzioni come i servizi e la modellazione dei dispositivi, il controllo dei dispositivi, la pubblicazione dei dati, l'analisi dei dati e la scoperta dei dispositivi.

Nella figura 1.2 si mostra uno schema funzionale di un dispositivo IoT.

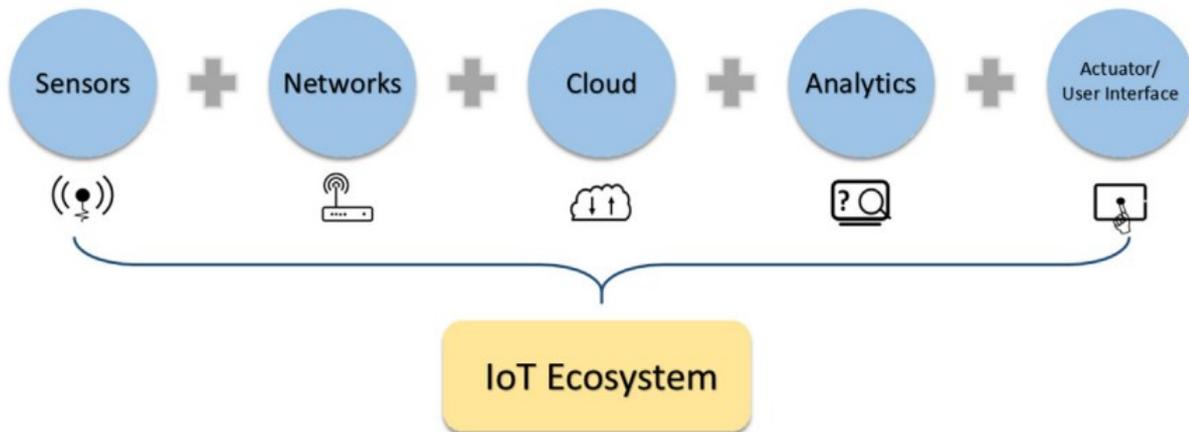


Figura 1.2 Componenti di un dispositivo IoT. (Jia et al., 2019)

Si può schematizzare l'architettura di una generica applicazione IoT in tre livelli. Questi tre livelli si muovono dal mondo fisico a quello digitale (del Sarto et al., 2022). In particolare:

- Livello di percezione. Si può paragonare questo livello ai cinque organi di senso dell'IoT: la sua funzione principale è quella di percepire le proprietà fisiche degli oggetti che fanno parte di un ambiente IoT in modo da indentificare gli oggetti e raccogliere le informazioni (Domingo, 2012).

Il livello di percezione è solitamente rappresentato da due tecnologie, la prima di rilevamento e la seconda di attuazione, rispettivamente implementate nei sensori e negli attuatori. È supportato principalmente da tecnologie come, ad esempio, reti di sensori WSN, videocamere, tag RFID, dispositivi di Near Field Communication (NFC), GPS, ecc. (Jia et al., 2019).

- Livello di rete. Trasmette le informazioni ottenute dal livello di percezione attraverso una rete composta da reti wireless private, Internet e sistemi di amministrazione della rete (del Sarto et al., 2022). I mezzi di comunicazione/tecnologie wireless principali sono ad esempio Wi-Fi, Bluetooth ecc. (Jia et al., 2019).
- Livello applicativo. È il livello superiore con cui interagiscono gli utenti finali, riceve i dati trasmessi e li presenta agli utenti per ulteriori servizi. Questo livello funge da interfaccia front-end per fornire risultati di analisi e di decisione per gli utenti (Jia et al., 2019).

I tre livelli sono rappresentati nelle figure 1.3 e 1.4.

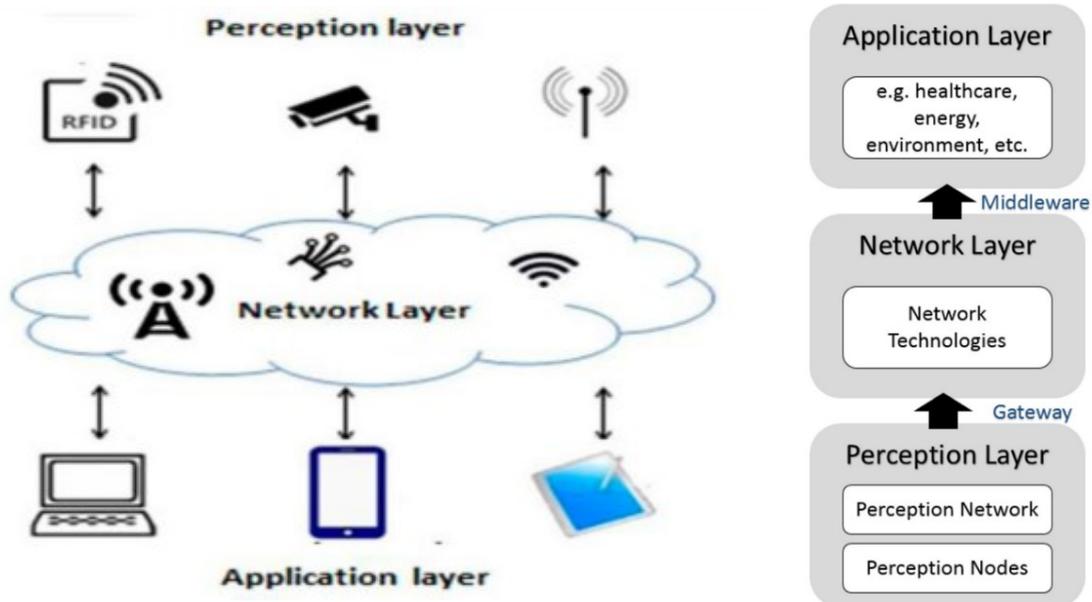


Figura 1.4 (a sinistra) I tre livelli dell'architettura dell'IoT. (del Sarto et al., 2022).

Figura 1.3 (a destra) Schema dell'architettura a tre livelli dell'IoT.(Jia et al., 2019)

2.2 I domini applicativi dell'IoT

Si possono ridurre i diversi domini applicativi possibili dell'IoT in quattro grandi macrodomini. Infatti, le potenzialità offerte dall'IoT rendono possibile lo sviluppo di un numero enorme di applicazioni, di cui solo una minima parte è attualmente sviluppata (Atzori et al., 2010). I quattro domini sono:

- Dominio dei trasporti e della logistica. Il traffico urbano è il principale responsabile dell'inquinamento dell'aria nelle città. Con un'efficiente implementazione dei dispositivi IoT si possono monitorare e pianificare i movimenti delle merci, oltre a scegliere il miglior percorso origine-destinazione (Gubbi et al., 2013).
- Dominio dell'assistenza sanitaria. Attraverso una teleassistenza, ad esempio, si potrebbe garantire una maggiore sicurezza al paziente.
- Ambiente intelligente (casa, ufficio, impianto). Nell'ambito privato, un esempio di applicazione dell'IoT potrebbe essere un dispositivo in grado di monitorare l'umidità del suolo del giardino e di comunicare con i programmi di irrigazione in modo da assicurare una corretta manutenzione del giardino (Maskuriy et al., 2019).
- Dominio personale e sociale. I telefoni cellulari ci permettono di scambiare

informazioni con gli altri attraverso piattaforme che si servono di Internet.

I domini sono sintetizzati nell'immagine seguente.

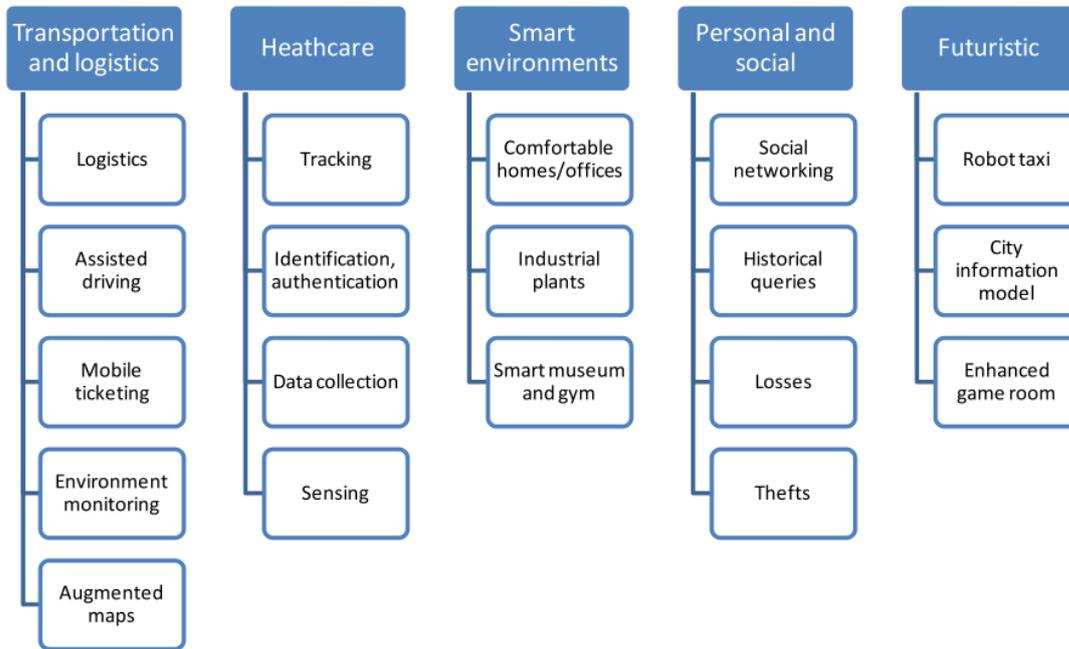


Figura 1.5 Domini applicativi dell'IoT. (Atzori et al., 2010)

2.3 IoT e smart buildings

Si definiscono smart buildings quegli edifici che, per ottenere massima efficienza energetica e comfort per gli utenti, combinano tecnologia dell'informazione, sicurezza, sviluppo sostenibile e automazione (Rashid et al., 2021). Alla base del concetto di edificio intelligente c'è la stretta connessione tra IoT e industria edilizia: infatti, gli edifici intelligenti prevedono un'ampia varietà di sensori, attuatori, dispositivi e sistemi di controllo che sono interconnessi e funzionano congiuntamente per migliorare il servizio per i suoi occupanti (Jia et al., 2019).

Per semplificazione sono state rintracciate cinque importanti applicazioni per gli smart buildings: energia, localizzazione, comfort, automazione e sicurezza.

2.3.1 Energia

Gli edifici rappresentano il quaranta per cento del consumo totale di energia nel mondo, per questo motivo l'efficienza energetica in un edificio è diventato uno dei temi di ricerca più significativi. D'altra parte, la diminuzione dell'utilizzo di energia non può compromettere il livello di servizio per gli utenti o per gli occupanti dell'edificio, il che richiede una soluzione che soddisfi entrambe le parti (Jia et al., 2019).

Per monitorare e controllare i fabbisogni energetici di un edificio sono stati creati i

sistemi BEMS⁵ (Gonzato, s.d.). Questi sistemi installano contatori non intrusivi sul circuito elettrico per raccogliere dati sul consumo energetico per i gestori e gli utenti dell'edificio. In questo caso si può dire che l'IoT aiuti gli edifici intelligenti nella gestione del consumo di energia (Rashid et al., 2021).

2.3.2 Localizzazione

Grazie alle tecnologie IoT si possono reperire le informazioni sul grado di occupazione dell'edificio, localizzare gli ambienti interni ed eventuali attrezzature o strutture che necessitano di manutenzione (Jia et al., 2019). Queste informazioni possono essere utilizzate per una serie di applicazioni dal sistema di gestione BMS. Ad esempio, il rilevamento dell'occupazione in tempo reale nei sistemi di edifici intelligenti può aiutare a controllare in maniera intelligente il sistema HVAC per ridurre il consumo di energia (Rashid et al., 2021). O ancora, fornire la navigazione assistita agli occupanti che non conoscono l'edificio diventerebbe una facilitazione per trovare la destinazione (Jia et al., 2019).

Ad oggi il problema principale risiede però nelle attuali tecnologie GPS, che non possiedono l'accuratezza desiderata all'interno degli edifici in quanto sono progettate per lo più per la georeferenziazione e i servizi a zone (Jia et al., 2019). Invece, le tecnologie di micro-localizzazione, che consentono una localizzazione più precisa, di solito fino a pochi centimetri, sono tecnologie basate su UWB (banda ultra-larga), RFID, sistemi di posizionamento wireless, mappatura del campo magnetico o sistemi basati su Bluetooth Low Energy (BLE) Beacon/iBeacon. Queste cinque tecnologie sono una parte promettente dell'IoT (Rashid et al., 2021).

2.3.3 Comfort

Un altro requisito fondamentale degli smart buildings per mantenere le condizioni ambientali ideali per gli utenti/occupanti dell'edificio è il comfort interno. Le persone trascorrono in media l'ottanta per cento della loro vita in un edificio; quindi, un ambiente interno sano e confortevole è fondamentale per il benessere e la produttività degli occupanti (Jia et al., 2019).

I futuri sistemi di smart building, come i sistemi HVAC, includono attuatori e sensori numerici, che consentiranno di configurare automaticamente le impostazioni di temperatura, sulla base di dati storici e sull'apprendimento empirico, in base alle esigenze e alle preferenze degli occupanti. L'implementazione di un sistema IoT che raccoglie dati e prende decisioni sta alla base dello sviluppo di queste funzioni (Rashid et al., 2021).

2.3.4 Automazione

La parte fondamentale dell'edificio intelligente è il BMS⁶, un sistema che controlla e

⁵ Building Energy Management System

monitora le apparecchiature meccaniche ed elettriche dell'edificio, come la ventilazione, l'illuminazione, l'alimentazione, i sistemi antincendio e di sicurezza (Rashid et al., 2021). Inoltre, le tecnologie BMS⁶, o altrimenti chiamate BACS⁷, forniscono un sistema di rilevamento automatico dei guasti e strategie di diagnosi per le prestazioni energetiche dell'edificio (Pradeep et al., 2019).

2.3.5 Sicurezza

Negli smart buildings sono installati sistemi di sicurezza basati sull'IoT. Questi permettono, ad esempio, di rilevare movimenti non autorizzati e di comunicare eventuali intrusioni all'interno degli edifici al proprietario tramite SMS o e-mail; o ancora, consentono il monitoraggio della temperatura e dell'umidità della stanza per individuare possibili incendi (Medhat et al., 2020).

3 DIGITALIZZAZIONE IN AMBITO EDILIZIO: LE INDUSTRY FOUNDATION CLASSES

Il BIM è ampiamente utilizzato e considerato una strategia di successo per archiviare, organizzare e gestire i metadati statici della progettazione, costruzione e manutenzione dell'edificio (Ignatov & Gade, 2019). Il BIM, infatti, consente di creare modelli virtuali in tre dimensioni capaci di simulare l'edificio e di svolgere la funzione di database delle informazioni relative alla rappresentazione architettonica ed ingegneristica, alla stima dei tempi e dei costi, alla valutazione energetica, ai costi di manutenzione e alle considerazioni di sostenibilità economica e ambientale.

Negli anni precedenti alla comparsa del BIM i vari attori del processo di costruzione dell'edificio adottavano tecnologie informatiche eterogenee, che ostuivano la condivisione e lo scambio di dati e informazioni (Laakso & Kiviniemi, 2012). Con IFC, acronimo di Industry Foundation Classes, si è cercato di dare una soluzione a questo ostacolo operativo, permettendo a sistemi informatici eterogenei di funzionare congiuntamente e comprendersi a vicenda (Chen et al., 2008).

Nell'agosto 1994 dodici aziende statunitensi si sono unite per esaminare la possibilità di sviluppare uno standard aperto per aumentare l'interoperabilità dei software emergenti di modellazione delle informazioni sugli edifici. Nel settembre 1995 fu formalmente fondata la IAI (Industry Alliance for Interoperability) - oggi buildingSMART - che aveva come scopo promuovere e pubblicare una specifica per la condivisione dei dati durante l'intero ciclo di vita del progetto (Laakso & Kiviniemi, 2012).

IFC è quindi un modello di prodotto neutro basato sullo standard STEP, sviluppato con il linguaggio EXPRESS da buildingSMART, ampiamente utilizzato nel mondo BIM (Building Information Modeling). IFC è uno standard internazionale aperto (ISO 16739-1:2020), è un

⁶ Building Management System.

⁷ Building Automation and Control System.

modello di dati generico e indipendente dall'implementazione, in base alla quale le API (Application Programming Interface) possono essere, e sono state, progettate per implementare il modello di dati in diversi ambienti applicativi e linguaggi di programmazione (Laakso & Kiviniemi, 2012). Dal 1994 ad oggi ha subito varie modifiche, si è evoluto ed ha aggiunto nuove classi e relazioni tra di esse fino ad arrivare all'ultimo rilascio (IFC4 Add2).

La specifica dello schema IFC è il principale prodotto tecnico di buildingSMART International per raggiungere il suo obiettivo di promuovere l'openBIM®, il cui principale scopo è di supportare la continuità di informazioni tra i partecipanti ad un progetto, garantendo l'interoperabilità durante tutto il ciclo di vita di un edificio. Lo stesso logo in figura 1.6, il quale rappresenta quattro anelli intrecciati tra loro, simboleggia la condivisione reciproca di informazioni durante le varie fasi del processo costruttivo.



Figura 1.6 Logo buildingSMART. (Home - buildingSMART Technical, s.d.)

3.1 Struttura dello schema dati IFC

Lo standard IFC è utilizzato per descrivere i componenti di un edificio, pertanto gli elementi, che possono essere elementi strutturali (pilastri, solai, travi, ecc.), zone, spazi o impianti, vengono descritti attraverso proprietà specifiche e possono stabilire relazioni, essere correlati tra loro, essere associati a costi, performance, documentazioni e molto altro.

Gli elementi non sono enumerati in una successione continua come in un elenco ma sono organizzati per classi di insiemi nidificati secondo una logica classificatoria. Questa viene esplicitata con la codifica cosiddetta EXPRESS - G che evidenzia le interdipendenze e le gerarchie fra gli elementi e i sub elementi.

La struttura IFC divide tutte le entità in "radicate" e "non radicate". Le entità radicate dipendono da *IfcRoot*, inteso come il nocciolo con il numero minimo di informazioni che un'entità deve avere, e hanno un concetto di identità, insieme ad attributi di nome, descrizione, e controllo di revisione. Le entità non radicate non hanno un'identità e le istanze esistono solo se si fa riferimento, direttamente o indirettamente, ad un'istanza radicata.

Lo schema dati IFC è un modello di dati standardizzato, che ha come radice l'*IfcRoot*. Quest'ultimo è suddiviso nei seguenti tre concetti:

- *IfcObjectDefinition* che cattura presenze e tipi di oggetti materiali: rappresenta

l'identità e la semantica (nome, identificatore univoco leggibile meccanicamente, tipo di oggetto o funzione);

- *IfcPropertyDefinition* che contiene proprietà dinamicamente estensibili sugli oggetti, ovvero le caratteristiche o gli attributi (come materiale, colore e proprietà termiche);
- *IfcRelationship*, relazioni che possono essere:
 - o tra oggetti;
 - o con concetti astratti (come performance, costing);
 - o con processi (installazione, operazioni);
 - o con persone (proprietari, designer, appaltatori, fornitori, ecc.).

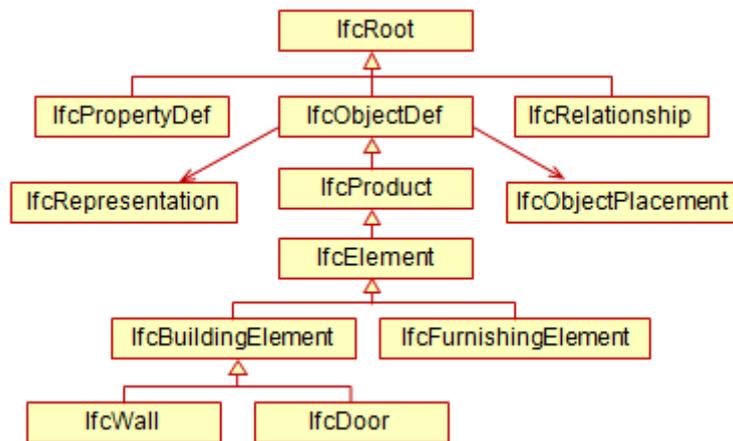


Figura 1.7 Schema dati IFC a partire da ifcRoot. (Part of the IFC hierarchy under IfcRoot | Download Scientific Diagram, s.d.)

L'architettura dello schema dati di IFC definisce quattro livelli concettuali, ogni singolo schema di dati è assegnato esattamente ad un livello concettuale. Le relazioni tra questi livelli sono rigorose e gerarchiche, la regola principale è che il riferimento può avvenire solo verso il basso nella gerarchia. Ciò significa che i dati nella *Resource layer* devono essere indipendenti e non devono fare riferimento a classi superiori (Laakso & Kiviniemi, 2012). Questi livelli sono:

- *Domain layer*. È livello più elevato, include schemi contenenti definizioni di entità che sono specializzazioni di prodotti, processi o risorse specifiche di una determinata disciplina, tali definizioni sono tipicamente utilizzate per lo scambio intra-dominio e la condivisione di informazioni;
- *Interoperability layer*. Assegna l'interfaccia ai modelli di dominio, fornendo così un meccanismo di scambio per consentire l'interoperabilità dei domini;

- *Core layer.* Questo include lo schema del kernel e i moduli di estensione del Core, contenenti le definizioni di entità più generali. Tutte le entità definite nel livello Core, o sopra, portano un id univoco globale e opzionalmente informazioni sul proprietario e sulla cronologia;
- *Resource layer.* È il livello più basso e contiene lo schema delle risorse, che contiene le definizioni di base destinate a descrivere gli oggetti nei livelli precedenti.

Nella seguente immagine viene rappresentato lo schema dai IFC e i livelli concettuali in ordine gerarchico.

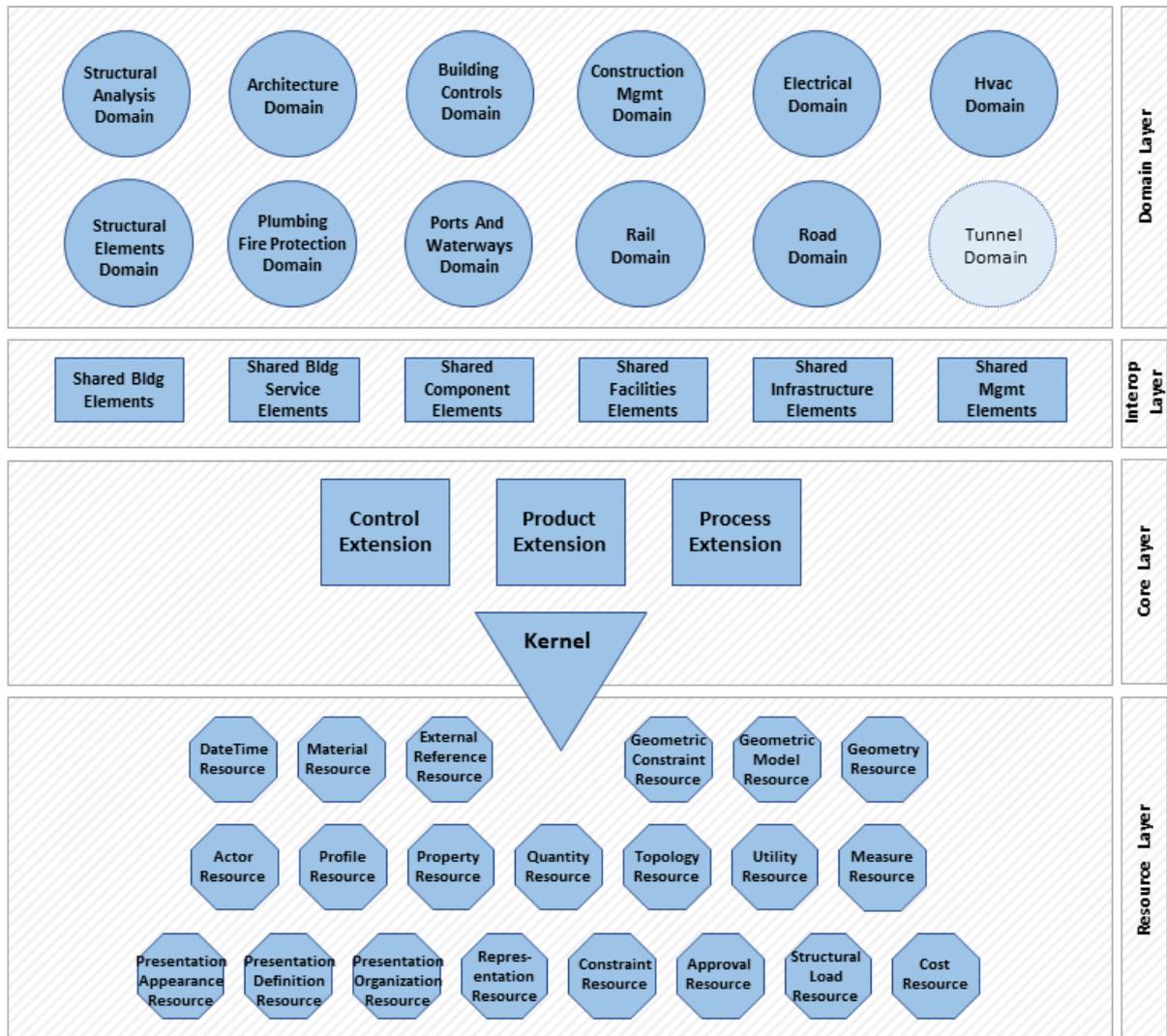


Figura 1.8 Livelli concettuali dello schema dati IFC. (Introduction, s.d.)

3.2 Formati file dello schema IFC

Il formato IFC si basa sullo standard STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data), il quale nasce con lo scopo di formulare norme per la definizione e lo scambio di informazioni interoperabili.

IFC adotta il linguaggio EXPRESS definito dalla norma ISO 10303-11 "Industrial automation system integration – Product data representation and exchange – Part 11: Description methods: The EXPRESS language reference manual". EXPRESS è un linguaggio di modellazione orientato agli oggetti e volto a fornire costrutti formali di definizione per la rappresentazione e l'interscambio dei dati del prodotto ISO. È rappresentato sia in un formato testuale che in un formato di annotazione grafica noto come EXPRESS-G (Nour & Beucke, 2008).

I dati IFC desiderati possono essere codificati in vari formati, come XML, JSON e STEP.

STEP Physical Format (SPF o IFC-SPF) è il formato più utilizzato nella pratica per IFC, il più compatto tra quelli elencati che può essere letto come testo. IFC-SPF si basa sullo standard ISO per la rappresentazione in chiaro dei modelli di dati EXPRESS ISO 10303-21. Ogni riga di codice si compone di un singolo oggetto registrato e ha estensione ".ifc".

L'Extensible Markup Language (XML) offre una maggiore leggibilità e i vantaggi di un'ampia gamma di strumenti software. ".ifcXML" si basa sullo standard ISO per la rappresentazione dei dati STEP in formato XML ISO 10303-28.

I dati IFC possono essere incorporati in un file ZIP. I dati incorporati possono essere codificati come SPF o XML, con dimensioni generalmente comparabili.

JSON offre una maggiore leggibilità e beneficia di un'ampia gamma di strumenti software. L'estensione relativa è ".json".

Capitolo Secondo

LA BUILDING AUTOMATION E I SUOI STANDARD

1 LA BUILDING AUTOMATION E I BUILDING AUTOMATION SYSTEMS

Il termine *building automation* si riferisce all'integrazione della tecnologia negli impianti del settore commerciale e dei servizi. Consiste nell'implementazione di sistemi smart e connessioni in grado di gestire i processi in un edificio tramite un'unità di controllo centralizzato, grazie ad app o altre piattaforme. Oggi, pertanto, indichiamo con *smart building* un edificio che sfrutta l'IoT per collegare vari sistemi e dispositivi a una dorsale tecnologica centralizzata.

Gli smart building includono principalmente due tipologie di soluzioni: quelli che integrano il sistema di Building Automation; e quelli che hanno solo per lo più risorse indipendenti che automatizzano una specifica funzione o un dispositivo all'interno dell'edificio (Graveto et al., 2022). In questa ricerca si farà riferimento alla prima tipologia

Un Building Automation System (BAS), o altrimenti BACS⁸ o BMS⁹, consiste in un sistema installato negli edifici che controlla e monitora i servizi dell'edificio responsabili del riscaldamento, del raffreddamento, della ventilazione, della climatizzazione, dell'illuminazione, dell'ombreggiatura, della sicurezza della vita, dei sistemi di sicurezza di allarme e molto altro. Un BAS mira ad automatizzare le attività in ambienti tecnologicamente abilitati, coordinando una serie di dispositivi elettrici e meccanici interconnessi in modo distribuito per mezzo di reti di controllo sottostanti. Questi sistemi possono essere implementati in infrastrutture industriali come le fabbriche, in edifici aziendali e centri commerciali, o anche in ambito domestico (Domingues et al., 2016).

EN ISO 16484 specifica le fasi richieste per i progetti BACS e l'hardware necessario per compiti all'interno di un BACS, nonché i requisiti generali funzionalità e comunicazione.

1.1 Sensori, controller e attuatori in un dispositivo di controllo BAS

Per comprendere appieno il funzionamento di un BACS è importante comprendere la distinzione importante tra apparecchiatura e dispositivo. I dispositivi sono apparecchiature che possono percepire, agire o coordinare l'azione direttamente sull'ambiente o su altre apparecchiature. Un dispositivo di controllo è un dispositivo che può essere collegato a un bus o a una rete di controllo per inviare o ricevere istruzioni di controllo. Sensori, attuatori,

⁸ Building Automation and Control System

⁹ Building Management System

contatori, controllori logici o gateway sono esempi di dispositivi di controllo. I dispositivi di controllo comunicano tra loro attraverso porte logiche indirizzate predefinite, note come *datapoint* (Vieira et al., s.d.).

I *datapoint* sono le unità di informazione di base indirizzabili in un BAS. Ogni *datapoint* ha un valore e una serie di attributi metadati che descrivono un insieme di regole per l'interazione con quel *datapoint*, dove possiamo trovare tipicamente il tipo di accesso, il tipo di dato, la posizione installata, l'influence zone e una frequenza di aggiornamento del valore per le operazioni di lettura e scrittura (Vieira et al., s.d.).

I *datapoint* possono essere fisici o virtuali. Un *datapoint* fisico è direttamente collegato a un dispositivo connesso al sistema, come le porte di I/O di un dispositivo (dove ogni porta può essere mappata su un *datapoint*). Un *datapoint* virtuale è invece un modo per indirizzare oggetti virtuali come i servizi forniti dai dispositivi, ad esempio un sensore di temperatura che espone un *datapoint* che, se letto, restituisce la temperatura media misurata nell'ultima ora, o un *datapoint* che indirizza un parametro di configurazione di un dato dispositivo, in quanto la scrittura di quel *datapoint* influisce sul parametro di configurazione associato (Domingues et al., 2016).

I *datapoint* offrono uno dei tre tipi di accesso: lettura, scrittura o entrambi. I *datapoint* leggibili sono di sola lettura e di solito si riferiscono a dispositivi sensoriali. I *datapoint* scrivibili sono di sola scrittura e si riferiscono a dispositivi attuatori: scrivere sui *datapoint* equivale ad aggiornare lo stato del sistema. I *datapoint* che offrono entrambi i tipi di accesso possono essere utilizzati per scrivere aggiornamenti in un dispositivo, ad esempio per accenderlo, e per leggere lo stato interno del dispositivo, ad esempio per sondare lo stato di accensione/spegnimento del dispositivo (Domingues et al., 2016).

Le funzioni di un BACS sono garantite grazie all'integrazione di quattro unità elementari che collaborano tra loro:

- i sensori (*sensor*), che rilevano informazioni dall'ambiente circostante e le trasmettono ai *controller*. Sono dispositivi che convertono una realtà fisica in un segnale che può essere misurato (Domingues et al., 2016);
- i *controller*, che raccolgono i dati, li elaborano e comandano i sistemi collegati, come sensori e attuatori. Entrambi si collegano alle porte I/O dei moduli hardware che producono segnali elettrici in base ai comandi di uscita digitali e creano letture dai segnali di ingresso;
- gli attuatori (*actuator*), che eseguono i comandi ricevuti dai *controller*. Hanno il compito di reagire ai segnali ricevuti dai *controller* chiudendo i circuiti o variando l'intensità dei carichi elettrici, che sono dispositivi come le tende delle finestre o le lampade a soffitto (Domingues et al., 2016);
- l'interfaccia operatore (*dispositivo*), che permette l'accesso e la gestione del sistema di automazione.

La schematizzazione di un dispositivo BACS è rappresentata nell'immagine 2.1.

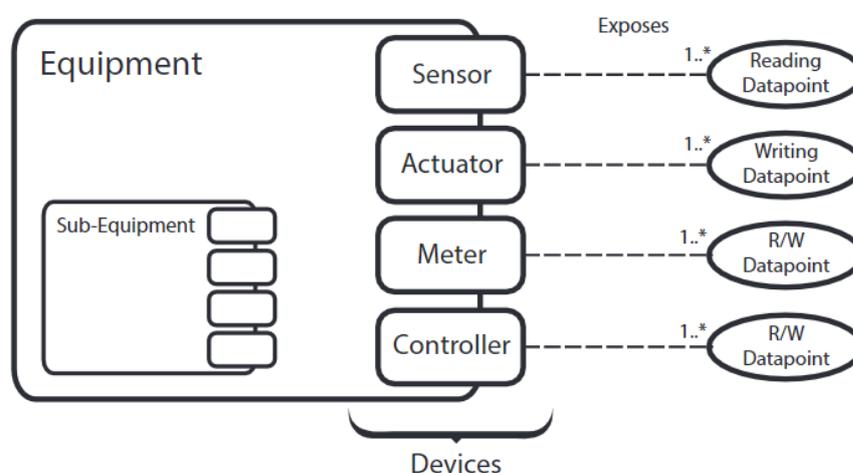


Figura 2.1 Dispositivo di controllo BAS. (Vieira et al., s.d.)

1.2 Modello di un dispositivo BAS

I dispositivi BAS hanno due interfacce: un'interfaccia elettrica, che definisce come collegare il dispositivo al resto del sistema, e un'interfaccia applicativa che consente ad altri dispositivi e applicazioni software di interagire con il dispositivo attraverso i punti dati esposti.

Ogni driver di dispositivo corrisponde a un particolare tipo di dispositivo, il che significa che un sistema che deve supportare centinaia di dispositivi diversi deve installare centinaia di driver di dispositivo. La considerevole diversità dei dispositivi disponibili pone una sfida alla creazione di un driver di dispositivo generico che si adatti a ogni dispositivo dello stesso tipo, cioè che abbia interfacce compatibili. L'interfaccia di un dispositivo si dice compatibile con un altro se alcune delle proprietà di un'interfaccia esistono nell'altra e condividono lo stesso tipo di dati. Ad esempio, un driver comune per le lampade che controlla tutti i dispositivi in cui tutte le lampade hanno le stesse proprietà su cui agire, come l'accensione o lo spegnimento degli alimentatori.

Possiamo distinguere ulteriormente tra driver di dispositivi hardware e driver di dispositivi software.

I driver di dispositivi hardware sono costituiti da moduli hardware con porte I/O e un microcontrollore. Le porte di I/O sono collegate a dispositivi fisici, che di solito non possiedono intelligenza e vengono azionati direttamente con segnali elettrici, come una lampada, un termistore o la ventola di un condizionatore d'aria. Il microcontrollore è responsabile del pilotaggio di questi dispositivi e dell'esposizione di un'interfaccia che può essere utilizzata per indirizzare ciascuna porta di I/O a fini di lettura e scrittura.

I driver di dispositivo software consistono in interfacce di programmazione di applicazioni utilizzate per consentire ad altre applicazioni di interagire con i dispositivi. I driver

dei dispositivi sono utilizzati per convertire i segnali elettrici in valori memorizzati in variabili o oggetti che possono essere letti dalle applicazioni software e viceversa, per convertire i valori in segnali elettrici che azionano i dispositivi attuatori.

In generale, i dispositivi fisici sono mappati in driver di dispositivi hardware, che forniscono un livello più elevato di astrazione, o in un driver di dispositivi software che agisce come un livello di astrazione dell'hardware, servendo altre applicazioni software con la capacità di far funzionare tali dispositivi, senza preoccuparsi dei dettagli di basso livello relativi all'hardware, come i protocolli di comunicazione dei dispositivi.

La figura 2.2 illustra questa situazione, in cui i dispositivi fisici sono collegati a porte I/O di un modulo hardware (che agisce come un driver di dispositivi hardware) in grado di fornire un'interfaccia che astrae queste connessioni. Tale interfaccia viene quindi utilizzata per collegare il modulo hardware (e quindi i dispositivi fisici) a una rete. D'altra parte, le applicazioni software richiedono un livello di astrazione, fornito da driver di dispositivi software, per operare su tali dispositivi. Il driver del dispositivo di rete implementa lo stack di protocollo della rete, astruendo i livelli superiori dalle specificità della comunicazione ed esponendo la presenza del modulo hardware nella rete. Segue il dispositivo driver del modulo hardware che opera direttamente sul modulo, fornendo un'interfaccia più semplice con il livello superiore, esponendo le porte del modulo e i meccanismi che semplificano i compiti di lettura e scrittura per tali porte. Ogni porta avrà un driver di dispositivo associato che esporrà il dispositivo collegato a quella porta e i meccanismi di funzionamento corrispondenti. Infine, le astrazioni di alto livello di questi dispositivi vengono create definendo oggetti che rappresentano tali dispositivi e che possono essere manipolati da applicazioni software (Domingues et al., 2016).

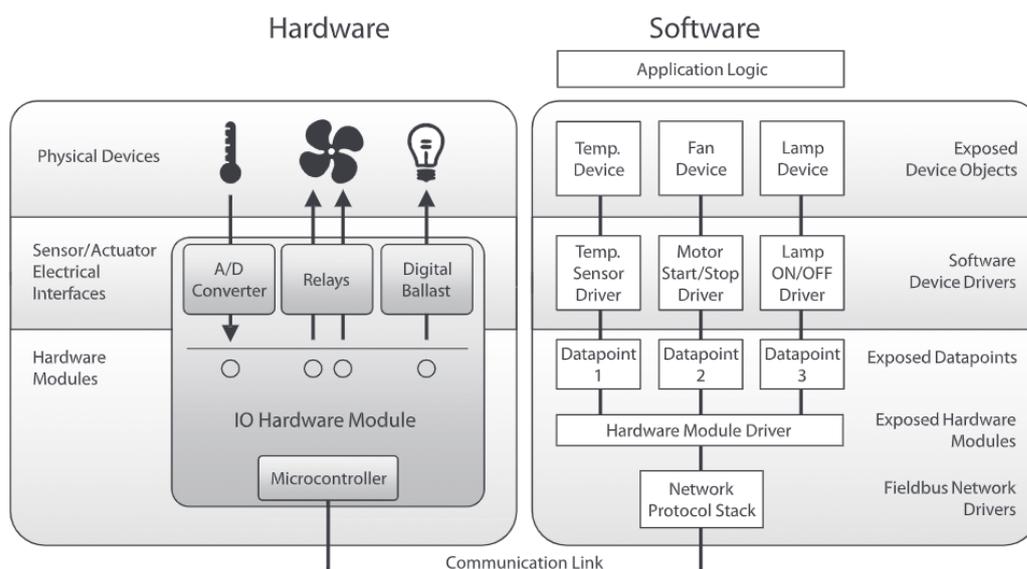


Figura 2.2 Illustrazione di uno stack hardware e software di automazione degli edifici. (Domingues et al., 2016)

1.3 Architettura BAS

Il concetto tecnologico originale del BAS si basava su dispositivi di controllo digitale diretto DDC¹⁰. Questo termine descrive una classe di dispositivi di controllo che possono essere paragonati funzionalmente al controllo logico programmabile PLC¹¹ derivato dall'area dell'automazione di fabbrica. Questi dispositivi di controllo hanno in genere una connessione diretta con le apparecchiature sensoriali e gli attuatori. Rispetto all'automazione di fabbrica, i processi controllati in un edificio sono meno locali. Inoltre, i confini dei processi sono più flessibili e possono cambiare dinamicamente durante la vita dell'edificio. Ad esempio, le stanze degli uffici possono essere riconfigurate. Ciò contribuisce a creare requisiti dinamici per i servizi dell'edificio. Per realizzare le funzioni menzionate in un BAS, è quindi indispensabile una comunicazione flessibile tra i componenti (Soucek & Zucker, 2012).

Il modello di comunicazione classico in BAS definisce tre livelli, rispettivamente dal basso verso l'alto sono:

- Il *Field Layer* è costituito dai sensori e dagli attuatori che si interfacciano con i dispositivi di campo. A permettere la comunicazione tra dispositivi di campo, quali controllori, sensori e attuatori, è il bus¹² di campo, un bus di dati digitali. Il bus di campo mira a migliorare la qualità della comunicazione rispetto ai precedenti bus di comunicazione analogici e a ridurre i costi di installazione grazie alla riduzione del cablaggio necessario, poiché i dispositivi collegati tramite il bus di campo comunicano solo digitalmente (Domingues et al., 2016). Il *Field Layer* è costituito quindi dalle apparecchiature che interagiscono con l'ambiente dell'edificio, dalle loro relazioni di cablaggio e dai dispositivi che le controllano (Vieira et al., s.d.);
- L'*Automation Layer* è costituito da controllori responsabili dell'orchestrazione dei dispositivi di controllo a livello di campo, secondo cicli di controllo predefiniti, e della raccolta dei dati prodotti (Vieira et al., s.d.). Con i DDC classici, il controllo è tipicamente locale agli I/O collegati. Con un bus di campo, i cicli di controllo possono estendersi su tutta la rete (Soucek & Zucker, 2012);
- Il *Management Layer* riceve informazioni dai controllori e ne gestisce la configurazione. Il livello di gestione fornisce anche le interfacce utente per le attività di gestione manuale, come il monitoraggio dello stato del sistema, la registrazione degli eventi, la

¹⁰ Direct Digital Control

¹¹ Programmable Logic Control

¹² Il bus, in elettronica e informatica, è un canale di comunicazione che permette a periferiche e componenti di un sistema elettronico di interfacciarsi tra loro scambiandosi informazioni o dati di vario tipo attraverso la trasmissione e la ricezione di segnali. In particolare, il bus dati è il bus sul quale transitano le informazioni.

configurazione manuale delle variabili, l'accesso ai dati storici o le notifiche di allarme (Vieira et al., s.d.).

In generale, i livelli superiori supervisionano e coordinano i livelli inferiori. La figura 2.3 illustra il funzionamento di un BAS secondo l'architettura a tre livelli.

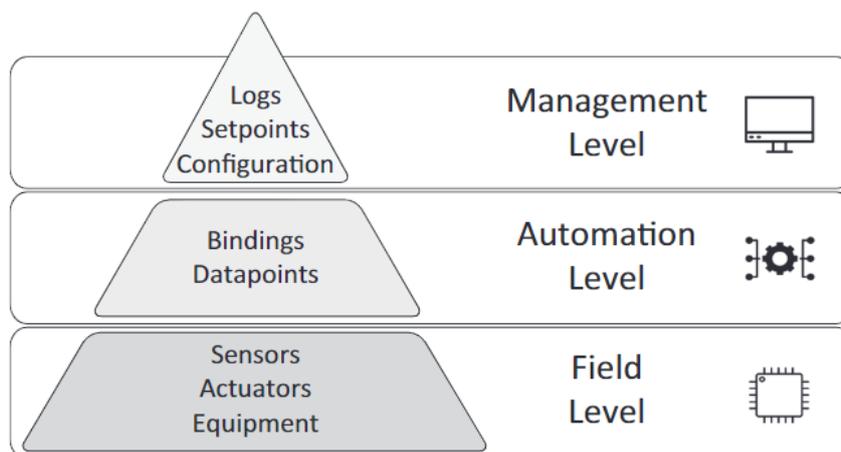


Figura 2.3 Architettura a tre livelli di un BAS. (Vieira et al., s.d.)

Derivata dal modello a strati, la comunicazione può essere classificata in due categorie (Soucek & Zucker, 2012):

- Comunicazione orizzontale. Questa categoria di comunicazione indica tutte le comunicazioni della stessa qualità tra componenti dello stesso livello. Nel livello di campo si tratta per lo più di dati di sensori e attuatori, basati su punti di dati che rappresentano astrazioni di unità fisiche. Un esempio è la comunicazione diretta tra un interruttore della luce e un attuatore della luce;
- Comunicazione verticale. Comprende la comunicazione di dati tra componenti di livelli diversi. Un flusso tipico è la fornitura di set point globali dalla gestione allo strato di automazione.

2 STANDARD PER LA COMUNICAZIONE DEI SISTEMI DI AUTOMAZIONE

I tre livelli funzionali (*Field, Automation e Management Layer*) esplicano attività differenti e di conseguenza necessitano di tecnologie e standard di comunicazione diversi che non possono soddisfare le richieste eterogenee. I più comuni protocolli e standard utilizzati dai BACS sono: BACnet, LonWorks, KNX, e ZigBee (Granzer & Kastner, 2012).

BACnet, LonWorks e EIB/KNX sono sistemi aperti che rivendicano la capacità di coprire le applicazioni BA nella loro interezza. Tutti hanno raggiunto una notevole importanza nel mercato mondiale (nel caso di BACnet e LonWorks) o nel mercato europeo (nel caso di EIB/KNX) e sono spesso scelti da clienti e integratori di sistemi per soluzioni complete (Kastner et al., 2005).

2.1 BACnet

Il protocollo BACnet (Building Automation and Control Networking Protocol), è stato sviluppato specificamente per rispondere alle esigenze dei sistemi di automazione e controllo degli edifici di ogni tipo e dimensione. Le funzionalità vitali per le applicazioni BA sono state integrate in BACnet fin dall'inizio per garantire il massimo livello possibile di interoperabilità in un ambiente che potrebbe coinvolgere più fornitori e più tipi di sistemi per edifici.

Lo sviluppo di BACnet è iniziato nel 1987, quando un comitato di progetto dell'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) non è riuscito a trovare un protocollo esistente che soddisfacesse tutti i criteri che i membri del comitato avevano in mente per un protocollo di comunicazione standard adeguato alle applicazioni di automazione degli edifici. Lo sforzo di sviluppo è stato completato nel 1995, quando BACnet è stato pubblicato per la prima volta come standard ANSI/ASHRAE (Kastner et al., 2005).

È diventato uno standard mondiale con la sua pubblicazione come standard ISO nel 2004 (ISO 16484-5). Anche lo standard complementare di BACnet "ANSI/ASHRAE Standard 135.1", *Method of Test for Conformance to BACnet*, è stato adottato come standard ISO (ISO 16484-6). Da allora, ogni anno vengono pubblicate versioni consolidate di entrambi gli standard BACnet, compresi tutti i miglioramenti (addenda) e le correzioni (errata). Lo standard BACnet è stato ampiamente implementato dai fornitori di automazione degli edifici ed è utilizzato in centinaia di migliaia di edifici in tutto il mondo.

Ad occuparsi del mantenimento e del continuo sviluppo dello standard BACnet è il Comitato BACnet. È composto da un insieme volutamente equilibrato di utenti, fornitori e altre parti interessate. Opera secondo i processi di sviluppo degli standard internazionali accettati per garantire che lo standard rimanga una specifica aperta e indipendente dai fornitori. Per garantire che lo standard rifletta un'ampia gamma di contributi e prospettive, le riunioni del Comitato e dei gruppi di lavoro sono aperte a tutte le parti interessate. Il Comitato BACnet utilizza il processo decisionale per consenso e suddivide il proprio lavoro tecnico in una serie di gruppi di lavoro. I gruppi di lavoro si concentrano su aree specifiche dello standard e forniscono

informazioni e raccomandazioni all'intero comitato.

BACnet fornisce una soluzione di rete indipendente dal fornitore per consentire l'interoperabilità tra apparecchiature e dispositivi di controllo per un'ampia gamma di applicazioni di automazione degli edifici. È stato progettato specificamente per soddisfare le esigenze di comunicazione dei sistemi di automazione e controllo degli edifici. Include un supporto specifico per le applicazioni di automazione degli edifici, quali riscaldamento, ventilazione, condizionamento dell'aria, illuminazione, controllo degli accessi, ascensori, sistemi di sicurezza e di rilevamento degli incendi. BACnet consente l'interoperabilità tra questi sistemi definendo messaggi di comunicazione, formati e regole per lo scambio di dati, comandi e informazioni di stato.

In generale, BACnet definisce un modello informativo che organizza i dispositivi del sistema utilizzando una collezione standard di oggetti. Questi oggetti rappresentano i servizi applicativi con i loro ingressi e uscite, come i dispositivi, i calendari e le pianificazioni, i comandi e i cicli di controllo. In BACnet un dispositivo è rappresentato da un oggetto dispositivo che definisce le sue proprietà, come il nome del modello del dispositivo, il fornitore del dispositivo, lo stato del dispositivo e l'elenco degli altri oggetti BACnet associati al dispositivo. Ad esempio, un dispositivo con due ingressi analogici avrà due istanze di oggetti analogici associati. Il modello BACnet prevede anche tipi di oggetti proprietari che consentono ai produttori di registrare funzionalità non coperte dagli oggetti standard, mettendo a rischio l'interoperabilità tra i dispositivi. Il funzionamento nel dettaglio di BACnet verrà specificato nella sezione tre di questo capitolo.

2.2 LonWorks

Echelon Corp., creatore del sistema LonWorks, ha contribuito all'adozione di uno standard aperto per l'interoperabilità tra i fornitori del settore delle reti di controllo. LonWorks è uno standard aperto per l'automazione e il controllo in rete per i mercati dell'edilizia, dei trasporti, dell'industria e della casa (Calantonea et al., 2002).

Le tecnologie di rete di controllo LonWorks sono state approvate da diversi anni come standard nazionali in Europa (EN 14908), America (ANSI/CEA/EIA-709) e Cina (GB/Z 20177). Come naturale evoluzione degli standard, questi sono stati presentati all'ISO/IEC per essere inclusi nel loro portafoglio di standard. La serie di norme EN 14908 è stata presentata per la standardizzazione internazionale al Comitato Tecnico Congiunto 1 (JTC 1) di ISO e IEC dall'InterNational Committee for Information Technology Standards (INCITS) statunitense nel 2007.

La tecnologia LonWorks è una soluzione completa per l'implementazione di reti di controllo distribuite. Queste reti sono costituite da nodi che comunicano tra loro attraverso una serie di mezzi di comunicazione utilizzando il protocollo LonTalk, un protocollo di comunicazione comune basato su messaggi. LonTalk offre due meccanismi di comunicazione:

tramite NV¹³ o tramite messaggi espliciti. Per il funzionamento standard, le NV sono il metodo di comunicazione preferito. Le NV stabiliscono e descrivono la connessione logica e il comportamento intercomunicante tra i nodi. La creazione di una connessione viene definita *binding* di una variabile di rete. A differenza dei messaggi espliciti, questo tipo di comunicazione utilizza messaggi impliciti; il protocollo LonTalk esegue l'intero scambio di dati per la comunicazione in modo trasparente al programma applicativo del nodo. Al contrario, il controllo dei messaggi espliciti è compito di un programma applicativo. La messaggistica esplicita viene utilizzata per trasferire grandi quantità di dati o per applicare un meccanismo di comunicazione richiesta-risposta (Malinowsky & Kastner, 2010).

Le reti di controllo LonWorks sono implementate attraverso microcontrollori, chiamati Neuron Chips, i ricetrasmittitori LonWorks, il protocollo LonTalk e la LNS (LonWorks Network Service) (Kim et al., 2000; Malinowsky & Kastner, 2010).

Il Neuron Chip è il cuore di quasi tutti i dispositivi basati su LonWorks: è un sistema completo su chip. Il Neuron contiene l'intero stack di protocollo¹⁴ LonTalk ed è composto da più CPU, memoria, I/O, porta di comunicazione, firmware e sistema operativo. Esistono due versioni di base del chip: una con tutta la memoria all'interno del chip e la seconda con un bus di indirizzi e dati per applicazioni di memoria esterna. Ogni chip Neuron ha tre processori residenti a 8 bit: due processori dedicati all'elaborazione del protocollo LonTalk e un altro dedicato al programma applicativo del nodo. I chip Neuron sono programmati in Neuron C, che estende lo standard ANSI C per supportare un approccio orientato agli oggetti per le applicazioni distribuite.

LonWorks supporta diversi ricetrasmittitori di comunicazione: doppino, linea elettrica, coassiale, RF (radiofrequenza), fibra ottica, infrarossi, ecc. A determinare il ricetrasmittitore per l'interfaccia multimediale sono i tipi di media e la velocità di comunicazione desiderata.

Il progetto del protocollo LonTalk segue il modello di riferimento dell'International Standards Organization per l'interconnessione dei sistemi aperti (ISO/OSI), che prescrive la struttura dei protocolli di comunicazione aperti.

La differenza tra LonWorks e le altre reti di controllo è che LonWorks dispone di soluzioni di gestione della rete, chiamate LNS, che è il sistema operativo (OS) o NMS (Network Management System) di LonWorks (Kim et al., 2000).

La figura 2.4 schematizza il funzionamento di una rete LonWorks. I nodi "1" e "2"

¹³ Una Network Virtualization, letteralmente "virtualizzazione di rete", è la capacità di simulare una piattaforma hardware in un software. L'hardware fisico rimane relativamente invariato, ma il software di calcolo o "istanza virtuale" risiede su un server in un altro punto della rete.

¹⁴ In informatica, uno stack di protocollo (o protocol stack) è un insieme di protocolli di comunicazione che lavorano insieme per consentire la comunicazione tra dispositivi di rete. Il protocollo di comunicazione più utilizzato è il TCP/IP.

rappresentano due dispositivi (che possono essere impianti HVAC, di illuminazione, di sicurezza ecc.) collegati alla rete LonWorks.

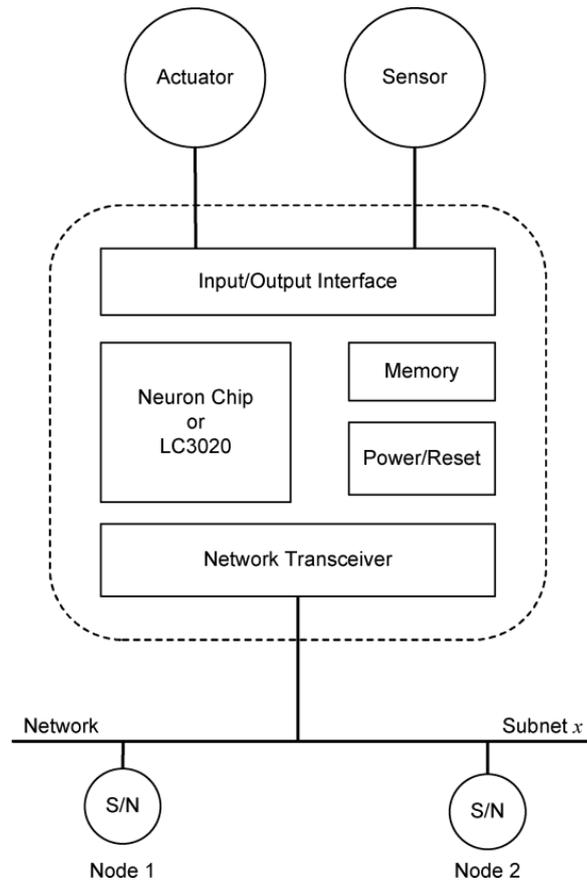


Figura 2.4 Funzionamento rete LonWorks. (Kastner et al., 2005)

Ogni dispositivo collegato in una rete LonWorks è chiamato "nodo". I nodi LonWorks non sono dispositivi "muti" privi di capacità di intelligenza. Hanno un proprio microprocessore che implementa sia il software applicativo che il protocollo LonTalk. Ogni nodo elabora i dati ricevuti e prende una decisione, che può tradursi nell'invio di nuovi pacchetti alla rete o in un'azione sul mondo fisico. Pertanto, una rete LonWorks può essere vista come un gruppo di dispositivi che lavorano in un sistema di comunicazione peer-to-peer¹⁵. È possibile implementare il monitoraggio (sensori) e l'attuazione (attuatori) per controllare un impianto. Le reti LonWorks hanno un'architettura piatta, non gerarchica (Canovas et al., s.d.).

2.3 KNX

L'European Installation Bus (EIB) è un bus di campo progettato per migliorare le

¹⁵ Un sistema di comunicazione peer-to-peer (P2P) è un tipo di sistema di comunicazione decentralizzato in cui ogni dispositivo connesso alla rete agisce sia come client che come server per gli altri dispositivi. In altre parole, invece di avere un server centrale che gestisce la comunicazione tra i dispositivi, ogni dispositivo si connette direttamente agli altri dispositivi sulla rete.

installazioni elettriche nelle case e negli edifici di tutte le dimensioni, separando la trasmissione delle informazioni di controllo dal tradizionale cablaggio di rete. EIB si basa su una specifica aperta mantenuta fino a poco tempo fa dall'Associazione EIBA (European Installation Bus Association) (Kastner et al., 2005). Nel maggio del 1999, i membri delle associazioni: EIBA, BCI (Batibus Club International), EHSA (European Home System Association), hanno fondato l'Associazione KNX per la promozione e lo sviluppo dello "standard unico" KNX per applicazioni di Home & Building Automation. Lo standard KNX è basato sulla consolidata tecnologia EIB ed integra le modalità di configurazione ed i mezzi trasmissivi di Batibus ed EHS, cercando di combinare i loro aspetti migliori. L'obiettivo di questa fusione era quello di creare un unico standard europeo per i sistemi elettronici per la casa e gli edifici. Allo stesso modo, l'EIBA ha unito le forze con la European HomeSystems Association e il Batibus Club International per formare la Konnex Association. Tuttavia, la tecnologia del sistema EIB continua a esistere immutata come un insieme di profili all'interno di KNX, spesso indicati come EIB/KNX (Kastner et al., 2005).

Lo standard è stato accettato come standard internazionale per l'automazione domestica e degli edifici (ISO/IEC14543 3) nel 2006. Inoltre, è stato approvato anche come standard europeo (CENELEC EN50090 e CEN EN 13321-1 e 13321-2), cinese (GB/T 20965) e statunitense (ANSI/ASHRAE 135).

Il concetto centrale di KNX si evolve intorno a un protocollo di campo basato su una topologia a bus per ridurre gli sforzi di cablaggio e migliorare la comunicazione tra dispositivi negli edifici funzionali. Il sistema bus KNX/EIB è un sistema indipendente dal produttore e dal campo di applicazione.

KNX/EIB supporta diversi mezzi fisici per la comunicazione: la linea elettrica (PL), il sistema di cablaggio a doppino (TP), la radiofrequenza (RF) e l'Ethernet, in conformità con il protocollo KNXnet/IP. L'apparecchiatura bus può essere un sensore o un attuatore, utilizzato per controllare i dispositivi di gestione dell'edificio, quali: illuminazione, ombreggiatura, gestione dell'energia, sistema di climatizzazione, sistema di segnalazione e monitoraggio, interfaccia di servizio e sistema di controllo dell'edificio, controllo remoto, ecc. Tutte queste funzioni possono essere controllate, monitorate e inviare segnali attraverso un sistema unificato, e non è necessario utilizzare un centro di controllo aggiuntivo (Pang et al., 2014).

Il mezzo tipicamente più usato è il doppino "Twisted Pair" (o "TP"), ed è un tratto di cavo (certificato anch'esso KNX) a cui è collegato un alimentatore a 29 volt. La topologia dell'impianto può essere lineare, o a stella, o un mix delle due: ciò che è importante è che il bus non debba compiere anelli chiusi. Il bus TP fornisce sia l'alimentazione che la comunicazione, utilizzando l'accoppiamento induttivo. Un'installazione a doppino è costituita da linee, ogni linea è composta da un massimo di quattro segmenti di linea interconnessi da ripetitori e ogni segmento interconnette fino a sessantaquattro dispositivi. Le linee sono interconnesse da accoppiatori di linea (LC). Gli accoppiatori di linea si collegano alla dorsale KNX tramite un

controllore di dorsale (BC¹⁶) e i dispositivi a cui si può accedere tramite un determinato BC fanno parte della stessa area¹⁷ (o zona) KNX. Gli accoppiatori di linea e i controllori di dorsale agiscono come router, cioè, filtrano i messaggi che inoltrano in base all'indirizzo di destinazione e all'id di dominio (se presente) (Hersent et al., 2011).

Nei sistemi KNX/EIB, il modo di connessione è il seguente: i bus nella zona principale sono collegati alla linea principale, la linea principale è collegata al bus. La componente base quindi per una rete di controllo KNX/EIB è la linea principale, a cui si allacciano i dispositivi (o nodi) (Kastner et al., 2005; Pang et al., 2014). L'architettura KNX è decentralizzata: i nodi possono interagire con altri nodi senza la necessità di un controllore centrale. Il funzionamento di una rete di controllo KNX/EIB è illustrato nell'immagine 2.5.

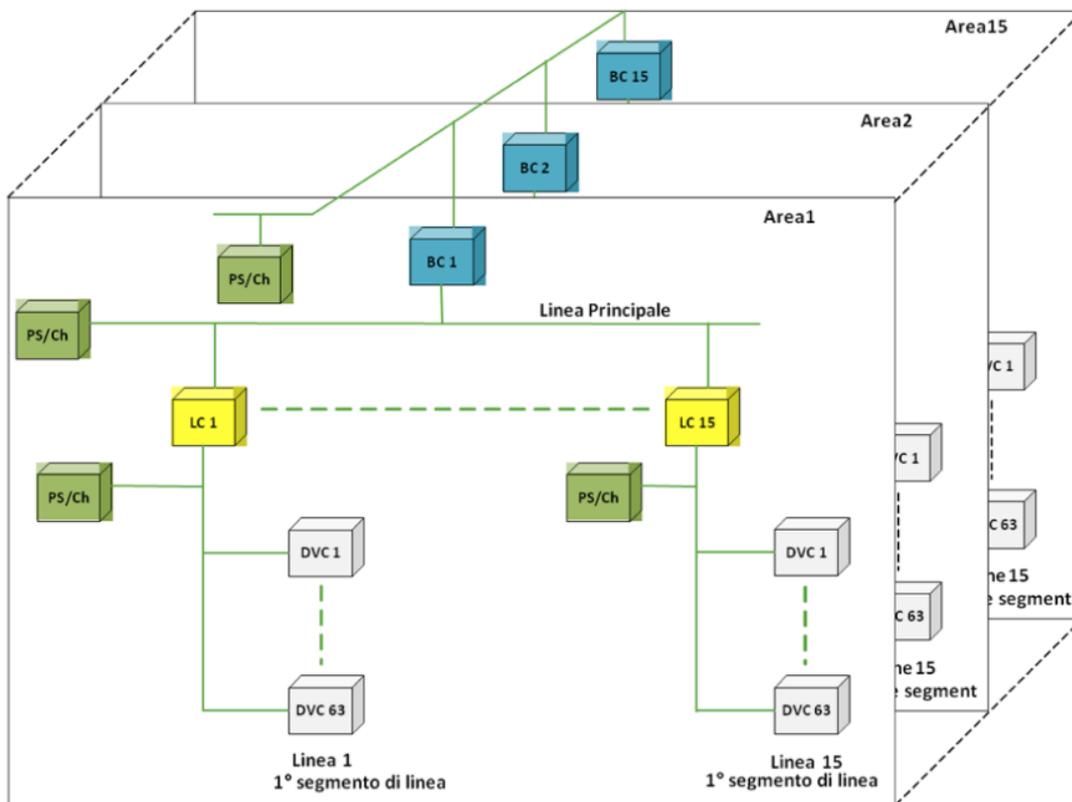


Figura 2.5 Un esempio di schema logico di un impianto KNX. (Cos'è e come funziona KNX - inDomus.it, s.d.)

La funzionalità delle applicazioni KNX è distribuita su vari blocchi funzionali, chiamati *functional blocks*. Ogni blocco funzionale è implementato da un singolo dispositivo/nodo e ogni dispositivo può ospitare più blocchi funzionali. Ogni nodo in una rete EIB/KNX è assegnato un indirizzo individuale corrispondente alla sua posizione all'interno della struttura topologica

¹⁶ Acronimo di Backbone Controller

¹⁷ È possibile realizzare impianti più complessi utilizzando più linee collegate da accoppiatori di linea; quella che si definisce "area", invece, è l'interconnessione di un massimo di 15 linee. L'interconnessione di 15 aree, invece, definisce "una dorsale".

della rete (zona/linea/dispositivo) (Kastner et al., 2005). Grazie a questo indirizzo univoco, è possibile inviare messaggi specifici a un singolo nodo, senza interferire con il funzionamento degli altri nodi presenti sulla rete.

Nello specifico, un blocco funzionale è descritto da un comportamento ben noto e consiste in uno o più *datapoint*. Un singolo *datapoint* rappresenta una particolare funzione o parametro controllato o monitorato da un dispositivo KNX. A seconda del tipo, un *datapoint* può essere un input o un output, nonché un parametro che influenza il comportamento del blocco funzionale. Per garantire l'interoperabilità, ogni *datapoint* ha un tipo di *datapoint* definito. Questo tipo *datapoint* dati indica il formato (ad esempio, la lunghezza in bit), la codifica, l'intervallo (ad esempio, i limiti superiori e inferiori del valore) e l'unità (ad esempio, percentuale) del *datapoint* (Granzer & Kastner, 2012).

Inoltre, i nodi KNX sono in grado di comunicare tra di loro utilizzando il protocollo di comunicazione standardizzato KNX, che garantisce l'interoperabilità tra i diversi dispositivi. La struttura di rete del bus di campo segue il modello di riferimento dei sistemi di interconnessione a sistema aperto. Il bus KNX/EIB, come specifica di protocollo intelligente, segue rigorosamente il modello OSI¹⁸ e ottimizza il livello di rete in modo ragionevole. È composto da cinque livelli: il livello fisico, il livello di collegamento dati, il livello di rete, il livello di trasporto e il livello di applicazione. La funzione del livello di sessione e del livello di presentazione nei protocolli a sette strati dei sistemi di interconnessione di riferimento aperti è incorporata nel livello di applicazione (Pang et al., 2014).

2.4 ZigBee

La ZigBee Alliance ha sviluppato uno standard di comunicazione wireless bidirezionale a bassissimo costo e a bassissimo consumo energetico. Le soluzioni che adottano lo standard ZigBee sono integrate nell'elettronica di consumo, nell'automazione domestica e degli edifici, nei controlli industriali, nelle periferiche dei PC, nelle applicazioni di sensori medici, nei giocattoli e nei giochi. ZigBee è uno standard basato su IEEE 802.15.4 che specifica il livello di rete e di applicazione. ZigBee consente ai dispositivi di comunicare senza fili, riducendo i costi di cablaggio e l'impatto estetico dell'installazione del sistema, fornendo un protocollo semplice, a bassa velocità, a basso consumo e conveniente per le applicazioni RF (Domingues et al., 2016; *ZigBee Specification*, 2008). I dispositivi Zigbee sono di tre tipi: coordinatore, router e nodo

¹⁸ Il modello Open Systems Interconnection (OSI) è un modello concettuale creato da International Organization for Standardization (ISO) che consente a sistemi di comunicazione differenti di dialogare utilizzando protocolli standard. In parole semplici, l'OSI fornisce uno standard che consente a sistemi informatici differenti di comunicare tra di loro. Il modello OSI può essere visto come un linguaggio universale per i collegamenti in rete tra computer. Si basa sull'idea di suddividere un sistema di comunicazione in sette livelli astratti, uno sopra l'altro. I sette livelli, rispettivamente dal basso verso l'alto sono: il livello fisico, il livello di collegamento dati, il livello rete, il livello trasporto, il livello sessione, il livello presentazione e il livello applicazione.

terminale. La tecnologia Zigbee supporta le reti a stella, ad albero e a maglia (Gao, 2022).

L'architettura dello stack ZigBee è costituita da una serie di blocchi chiamati livelli. Ogni livello esegue una serie specifica di servizi per il livello superiore. I tre livelli principali sono: l'*Application Layer* (APL), a sua volta ripartito in altri tre livelli, e il *Network Layer* (NWK), anch'esso suddiviso in ulteriori sottolivelli.

Il modello informativo di ZigBee (APL) è definito principalmente da tre livelli che gestiscono gli oggetti del dispositivo, gli endpoint e i binding tra questi ultimi. Sono noti come *Application Support Sublayer*, *ZigBee DeviceObject* e *Application Framework*.

L'*Application Support Sublayer* (APS) è responsabile del binding degli end-point, dell'inoltro dei messaggi tra i dispositivi vincolati e della gestione dei gruppi. I gruppi di dispositivi sono supportati dall'indirizzamento di gruppo, dove la scrittura di un determinato indirizzo può comportare la scrittura di diversi dispositivi.

Il livello *ZigBee Device Object* è responsabile della gestione complessiva del dispositivo ed è specificamente responsabile della definizione:

- della modalità operativa del dispositivo, che indica se un dispositivo coordina le comunicazioni di rete o agisce come dispositivo finale;
- della scoperta del dispositivo e della determinazione dei servizi applicativi che il dispositivo fornisce (ogni servizio applicativo corrisponde a un endpoint di un dispositivo);
- della gestione delle richieste di binding da parte di altri dispositivi o coordinatori.

Infine, l'*Application Framework* ospita le applicazioni del dispositivo. Un *Application Object* indica i servizi che il dispositivo può offrire; ad esempio, un *Application Object* può essere una lampadina, un interruttore, un LED o una linea di I/O. Ogni dispositivo ZigBee può avere una serie di applicazioni. Ogni dispositivo ZigBee può avere fino a 240 applicazioni, quindi in ogni dispositivo sono riservati a questo scopo 240 endpoint. Per comunicare con altri dispositivi, le applicazioni fanno uso di specifiche unità di dati del protocollo, chiamate cluster, che consistono in strutture di messaggi predefinite costituite da comandi e attributi, simili a un oggetto nel contesto della programmazione orientata agli oggetti, di cui entrambi i dispositivi comunicanti sono a conoscenza, garantendo così l'interoperabilità. Ad esempio, un cluster on/off definisce come accendere o spegnere qualcosa. Questo cluster è abbastanza generico per lavorare con interruttori della luce, pompe, apriporta di garage e qualsiasi altro dispositivo che possa essere acceso o spento. La libreria cluster di ZigBee fornisce cluster per la gestione di gruppi di dispositivi, scenari e notifiche di allarme (Domingues et al., 2016).

Il *Network Layer* è necessario per fornire funzionalità per garantire il corretto funzionamento del sottolivello MAC IEEE 802.15.4 e per fornire un'adeguata interfaccia di servizio all'*Application Layer*. Per interfacciarsi con l'*Application Layer*, il *Network Layer* include concettualmente due entità di servizio che forniscono le funzionalità necessarie. Queste entità

di servizio sono il servizio dati e il servizio di gestione. L'entità dati del livello NWK (NLDE¹⁹) fornisce il servizio di trasmissione dati tramite il suo SAP²⁰ associato, il NLDE-SAP, e l'entità di gestione del livello NWK (NLME²¹) fornisce il servizio di gestione tramite il suo SAP associato, il NLME-SAP. L'NLME utilizza l'NLDE per raggiungere alcune delle sue attività di gestione e mantiene anche un database di oggetti gestiti noto come la base di informazioni di rete (NIB²²).

La specifica ZigBee attuale assume l'uso dei sottolivelli *Medium Access Control* MAC e *Physical Layer* PHY definiti nella specifica IEEE 802.15.4 del 2003. Il sottolivello PHY in ZigBee fornisce la trasmissione dei dati su un canale radio, specificando i parametri per la modulazione, la codifica dei dati, la sincronizzazione e la gestione del canale. Il sottolivello MAC controlla l'accesso al canale radio utilizzando un meccanismo CSMA-CA. Le sue responsabilità possono includere anche la trasmissione di frame di segnalazione, la sincronizzazione e la fornitura di un meccanismo di trasmissione affidabile (*ZigBee Specification*, 2008).

Il livello di rete ZigBee (NWK) supporta topologie a stella, ad albero e a maglia. In una topologia a stella, la rete è controllata da un unico dispositivo chiamato coordinatore ZigBee. Il coordinatore ZigBee è responsabile dell'avvio e della manutenzione dei dispositivi della rete. Tutti gli altri dispositivi, noti come dispositivi finali, comunicano direttamente con il coordinatore ZigBee. Nelle topologie a maglia e ad albero, il coordinatore ZigBee è responsabile dell'avvio della rete e della scelta di alcuni parametri chiave della rete, ma la rete può essere estesa attraverso l'uso di router ZigBee. Nelle reti ad albero, i router spostano i dati e i messaggi di controllo attraverso la rete utilizzando una strategia di routing gerarchico. Le reti ad albero possono impiegare una comunicazione orientata ai beacon, come descritto nella specifica IEEE 802.15.4. Le reti mesh consentono una comunicazione peer-to-peer completa. I router ZigBee nelle reti mesh attualmente non emettono i normali beacon IEEE 802.15.4 (*ZigBee Specification*, 2008).

¹⁹ Acronimo di Network Layer Data Entity.

²⁰ Un'entità dati fornisce un servizio di trasmissione dati e un'entità di gestione fornisce tutti gli altri servizi. Ogni entità di servizio espone un'interfaccia al livello superiore attraverso un punto di accesso al servizio (SAP, acronimo di Service Access Point), e ogni SAP supporta una serie di primitive di servizio per raggiungere la funzionalità richiesta.

²¹ Acronimo di Network Layer Management Entity.

²² Acronimo di Network Information Base.

L'immagine 2.6 illustra la descrizione dell'architettura dello stack ZigBee

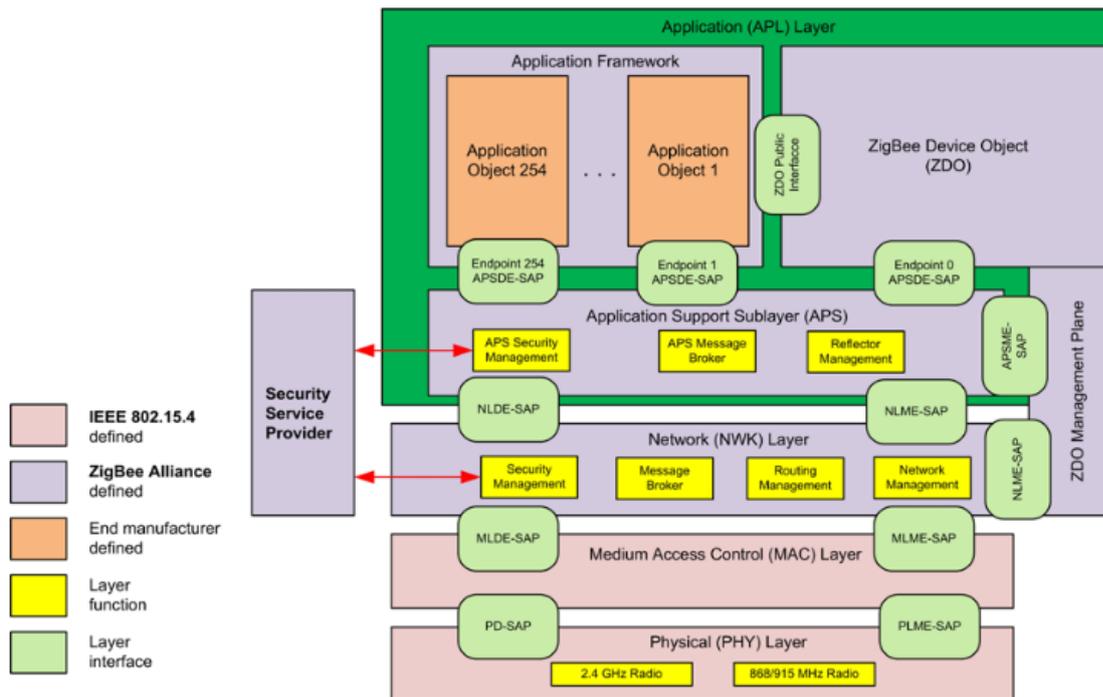


Figura 2.6 Architettura dello stack ZigBee. (ZigBee Specification, 2008)

2.5 Altre tecnologie

Altre tecnologie frequentemente utilizzate nei BAS sono EnOcean, Insteon, Modbus e Z-Wave. EnOcean e Z-Wave definiscono protocolli di comunicazione wireless a bassa potenza. I loro aspetti elettrici intrinseci sono solitamente impiegati nell'automazione domestica e industriale. Analogamente, Insteon supporta, ma non si limita alla comunicazione wireless ed è generalmente utilizzato per l'automazione domestica. D'altra parte, Modbus specifica un protocollo di messaggistica a livello applicativo per la comunicazione tra dispositivi di automazione (principalmente incentrato sullo scambio di messaggi tra controllori), che può essere implementato utilizzando diversi tipi di bus e reti (ad esempio, Modbus RTU o Modbus TCP). Tuttavia, questi standard tecnologici definiscono principalmente protocolli di trasmissione di messaggi e non specificano modelli informativi interessanti nel contesto dell'interoperabilità. In effetti, le decisioni sulle modalità di esecuzione dei comandi specifici dei dispositivi e dei concetti di primo livello (come scenari o allarmi) sono lasciate ai produttori di hardware (Domingues et al., 2016).

Per quanto riguarda gli impianti di illuminazione, Digital Addressable Lighting Interface (DALI) è un protocollo ampiamente adottato per collegare i dispositivi di controllo ai driver dei dispositivi di illuminazione e agli apparecchi di illuminazione. DALI è un protocollo di comunicazione standard per il controllo dell'illuminazione (Adam, 2019).

2.5.1 *EnOcean*

La tecnologia EnOcean è una tecnologia wireless di raccolta dell'energia utilizzata principalmente nei sistemi di automazione degli edifici. Viene adottata anche da altre applicazioni nell'industria, nei trasporti e nelle case intelligenti. EnOcean è una tecnologia di rete wireless che, soprattutto in Europa, sta riscuotendo un grande successo in quanto combina la flessibilità dei dispositivi wireless con approcci innovativi per l'accumulo di energia che risolvono l'importante problema delle batterie, comune ai dispositivi wireless (Ploennigs et al., 2010). Infatti, lo standard EnOcean funziona a bassissimo consumo energetico e consente la comunicazione wireless tra sensori, interruttori, controllori e gateway senza batteria. Nel marzo 2012 lo standard wireless EnOcean è stato ratificato come standard internazionale ISO/IEC 14543-3-10 (Sha & Kaur, 2014).

L'architettura della rete EnOcean è composta dal livello fisico, dal livello di collegamento dati, dal livello di rete e dal livello di applicazione. I primi tre livelli sono basati sullo standard internazionale ISO/IEC 14543-3-10, mentre il livello applicativo è sviluppato da EnOcean Open Alliance (Wen & Wang, 2018). Per garantire una migliore integrazione, l'alleanza EnOcean fornisce il livello EnOcean Equipment Profiles (EEP) che si trova nel livello applicativo per raggiungere l'interoperabilità tra diversi tipi di prodotti e fornitori con questo standard (Marksteiner et al., 2017). EEP definisce la struttura e la semantica dei datapoint di uso comune e dei loro messaggi.

Nel livello fisico vengono trasmessi i dati protetti, utilizzando il metodo di modulazione ASK, con una banda di frequenza radio di 315MHz o 868mMHz con una velocità di trasmissione di 125kb/s. La distanza di comunicazione standard per l'interno è di trenta metri, per l'esterno di trecento (Sha & Kaur, 2014; Wen & Wang, 2018).

Il livello di collegamento dati è responsabile della gestione del meccanismo temporale dei messaggi secondari e del test di integrità dei dati. Per garantire l'affidabilità della trasmissione, nell'invio si utilizzerà il meccanismo di "pre-monitoraggio", inoltre ogni messaggio sarà basato su uno specifico algoritmo temporale per essere inviato tre volte.

Il livello di rete è responsabile della conversione, dell'inoltro e del potenziale orientamento dei pacchetti di dati (Wen & Wang, 2018).

EnOcean prevede tre classi di dispositivi (Ploennigs et al., 2010):

- interruttori dedicati (PTM) e dispositivi sensori (STM) che supportano solo la trasmissione unidirezionale;
- dispositivi attuatori dedicati (RCM) per la ricezione unidirezionale;
- dispositivi bidirezionali flessibili (TCM) che gestiscono entrambe le funzioni.

2.5.2 *Z-Wave*

Z-Wave è un protocollo wireless per il collegamento di apparecchi di automazione a

casa e nelle reti di sensori wireless. È orientato e mira a fornire un modo semplice e credibile per controllare in modalità wireless i dispositivi automazione degli edifici o delle case. Esistono molti prodotti Z-Wave venduti con vari marchi. Questo protocollo è stato sviluppato da una start-up danese chiamata Zensys e acquisita da Sigma Designs. Una rete Z-Wave è controllata a distanza tramite Internet, utilizzando un gateway Z-Wave o un apparecchio di controllo centrale (Yassein et al., 2016).

Z-Wave opera nella banda di frequenza radio industriale, scientifica e medica (ISM). Trasmette a 868,42 MHz (Europa) e 908,42 MHz (Stati Uniti), frequenze progettate per le comunicazioni dati a bassa larghezza di banda in dispositivi embedded come sensori di sicurezza, allarmi e pannelli di controllo per l'automazione domestica (Fouladi & Ghanoun, s.d.).

Il protocollo Z-Wave forma una rete a maglie con un dispositivo di controllo primario e fino a 232 nodi, ognuno dei quali può agire come ripetitore di pacchetti - ad eccezione dei nodi alimentati a batteria - per instradare i dati Z-Wave anche quando le due parti comunicanti non possono stabilire un collegamento radio diretto tra loro.

Una rete Z-Wave è composta da due apparecchiature: i controller e gli slave (dispositivi come ad esempio sensori di sicurezza, allarmi o dispositivi di automazione domestica). Gli slave ricevono ed eseguono il comando dal controller e non hanno una tabella di routing; tuttavia, a volte contengono una mappa di rete che consiste nelle informazioni sulle rotte verso diversi dispositivi. Sebbene possano esserci più di un controller centrale che cerca di trovare il percorso e la sicurezza, c'è sempre solo un controller che porta le informazioni affidabili sulla topologia della rete. Quindi ci sono due tipi di controller e diverse funzioni per ogni tipo che vengono indicati come controller primario e controller secondario (Yassein et al., 2016).

Un aspetto distintivo di Z-Wave è il modo in cui i dispositivi entrano ed escono dalla rete. Questo processo di inclusione o accoppiamento è simile alla procedura di accoppiamento dei dispositivi Bluetooth. Un utente che desidera aggiungere un dispositivo alla rete deve innanzitutto mettere il controller Z-Wave e il nuovo dispositivo in modalità di accoppiamento. Mentre la modalità di accoppiamento può variare a seconda del dispositivo, di solito si attiva premendo un pulsante o resettando fisicamente il dispositivo. Durante la modalità di accoppiamento, il controller aggiunge tutti i dispositivi che si trovano anche in modalità di accoppiamento. A seconda dell'implementazione del controller, può presentare un elenco dei dispositivi trovati e consentire all'utente di selezionare quelli da aggiungere. In alternativa, il controller può aggiungere tutti i dispositivi rilevati entro la portata fisica senza discriminazione (Badenhop et al., 2017).

Il protocollo di Z-Wave si costituisce di un'architettura a quattro livelli: il livello applicativo, il livello di routing, il livello di trasferimento e il livello fisico.

La raccomandazione ITU-T G.9959²³ contiene le specifiche del livello fisico e MAC per la comunicazione radio sub GHz, compreso il protocollo Z-Wave. Inoltre, delinea alcuni aspetti del livello di trasporto Z-Wave, come i formati dei frame e il controllo Beam, necessari per comunicare con le serrature Z-Wave (Fouladi & Ghanoun, s.d.). Il livello MAC controlla il mezzo a radiofrequenza (RF) che a sua volta è controllato dall'hardware wireless ed è indipendente dal mezzo RF. Nel livello MAC di Z-wave, i dati vengono suddivisi in "frame a 8 bit" che vengono inoltrati attraverso la rete; i dati vengono codificati per ottenere un segnale libero di corrente continua, che è il flusso unidirezionale di carica elettrica (Yassein et al., 2016).

Il livello di trasferimento del protocollo Z-Wave amministra la connessione tra due dispositivi sequenziali, includendo la ritrasmissione, il controllo della somma di controllo e l'ACK che mostra se la connessione è riuscita o meno; deve quindi garantire che lo scambio tra i dispositivi avvenga senza errori.

Il livello di routing del protocollo Z-Wave gestisce l'inoltro dei frame attraverso la rete Z-Wave da un singolo dispositivo all'altro. Tutti i nodi, siano essi controller o slave, possono collaborare all'inoltro dei frame; questa collaborazione avviene quando questi nodi sono in ascolto e hanno una sede fissa per tutto il tempo. Questo tipo di livelli garantisce che i frame siano duplicati tra i nodi da un dispositivo all'altro. Inoltre, è responsabile dell'analisi della struttura della rete intelligente per raccogliere le informazioni su tutti i nodi e mantenere una tabella di routing nel controller primario basata su queste informazioni. Trovare il percorso tra la sorgente e la destinazione non è facile perché un dispositivo di controllo portatile (ad esempio, un telecomando) si può spostare in continuazione (Yassein et al., 2016).

Il livello applicativo è responsabile dell'analisi del payload del frame²⁴ e della decodifica dei comandi Z-Wave e dei parametri forniti. Se il nodo era un dispositivo di controllo Z-Wave, il comando decodificato e i parametri associati saranno inoltrati al software di controllo in esecuzione sul computer o sull'apparecchio di controllo domestico (Fouladi & Ghanoun, s.d.).

2.5.3 Insteon

Insteon è una soluzione sviluppata per l'automazione domestica e degli edifici da SmartLabs e promossa da Insteon Alliance. È disponibile una vasta gamma di dispositivi Insteon, tra cui luci a LED, interruttori luminosi dimmerabili, sensori di apertura/chiusura e telecamere di sicurezza. I dispositivi Insteon godono di un'accettazione generale all'interno della comunità dell'Internet of Things grazie all'interoperabilità con Amazon Echo e il sistema audio surround Sonos. Applicazioni su Apple iOS, Google Android e Microsoft Windows forniscono interfacce

²³ È la raccomandazione G.9959 dell'International Telecommunication Union (ITU) riguardo i ricetrasmittitori digitali di radiocomunicazione a corto raggio e banda stretta, e le specifiche dei livelli PHY e MAC.

²⁴ In informatica, il termine *payload* si riferisce ai dati effettivi contenuti in un pacchetto di informazioni. Il payload è quindi l'informazione utile che viene trasmessa attraverso una rete o elaborata da un sistema informatico.

per il monitoraggio e la modifica dei dispositivi. Una delle caratteristiche distintive di Insteon è il fatto che definisce una topologia a rete composta da collegamenti RF e di rete. I dispositivi possono essere solo RF o solo power-line, oppure possono supportare entrambi i tipi di comunicazione. I segnali RF di Insteon utilizzano la modulazione FSK (Frequency Shiftkeying) alla frequenza centrale di 904 MHz, con una velocità di trasmissione dei dati grezzi di 38,4 kb/s (Gomez & Paradells, 2010; Mays et al., 2017).

I dispositivi sono collegati tra loro da un link punto a punto, il che significa che ogni dispositivo può trasmettere, ricevere o ripetere un messaggio lanciandolo simultaneamente in piccole fasce orarie sincronizzate con l'attraversamento dello zero della linea elettrica. La comunicazione tra dispositivi che non si trovano nello stesso raggio d'azione avviene mediante un approccio multihop che si differenzia per molti aspetti dalle tecniche tradizionali. Tutti i dispositivi ritrasmettono i messaggi che ricevono, a meno che non siano loro stessi la destinazione dei messaggi. Il numero massimo di hop per ogni messaggio è limitato a quattro. La trasmissione multihop viene eseguita utilizzando uno schema di sincronizzazione degli slot temporali, in base al quale le trasmissioni sono consentite in determinati slot temporali e i dispositivi all'interno dello stesso intervallo non trasmettono messaggi diversi nello stesso momento. Le fasce orarie sono definite da un numero di attraversamenti dello zero della linea di alimentazione. I dispositivi RF non collegati alla linea elettrica possono trasmettere in modo asincrono, ma i messaggi trasmessi saranno ritrasmessi in modo sincrono dai dispositivi RF collegati alla linea elettrica. A differenza dei classici meccanismi di prevenzione delle collisioni, i dispositivi all'interno dello stesso raggio d'azione possono trasmettere simultaneamente lo stesso messaggio. Questo approccio, chiamato simulcast, si basa sulla bassissima probabilità che segnali multipli simultanei vengano cancellati dal ricevitore. Inoltre, il simulcast evita la necessità di memorizzare lo stato per rendere possibile la comunicazione multi hop. Il vantaggio del simulcast è che i dati possono essere raggiunti attraverso un percorso alternativo quando un dispositivo intermedio non è disponibile. (Gomez & Paradells, 2010; Sivasankari et al., s.d.).

Nel protocollo Insteon, i mittenti trasmettono messaggi attraverso la linea elettrica di un edificio, mentre i ricevitori ascoltano i messaggi e inviano una conferma al ricevimento. Il protocollo limita le trasmissioni a brevi intervalli in prossimità del punto in cui la corrente alternata (CA) attraversa lo zero, che si verifica due volte ogni 16,6 ms a 60 Hz CA, poiché il rumore elettrico ostacola la comunicazione ed è minimo durante l'attraversamento dello zero (Barker et al., 2017).

2.5.4 ModBus

Formulato originariamente nel 1979 dall'azienda Modicon (successivamente acquistata da Schneider), il protocollo ModBus è uno dei protocolli di controllo industriale più vecchi ma più utilizzati. È un protocollo di messaggistica di livello applicativo che fornisce una comunicazione client/server tra dispositivi collegati su diversi tipi di bus o reti. Grazie alla sua semplicità, ModBus è diventato uno degli standard de-facto per le comunicazioni industriali basate su messaggi seriali dal 1979 (Hersent et al., 2011; Huitsing et al., 2008).

Rispetto ad altri protocolli fieldbus, il protocollo ModBus presenta i seguenti tre vantaggi distinti (Hui et al., 2012):

- Standard aperto: gli utenti sono liberi e sicuri di utilizzare il protocollo MODBUS senza pagare diritti di licenza e senza violare i diritti di proprietà intellettuale;
- Orientamento al messaggio: ModBus può supportare una varietà di interfacce elettriche, come RS232, RS422, RS485, Ethernet, ecc. Può anche essere trasmesso su diversi supporti, come doppino, fibra ottica e RFID. Va notato che è diverso da molti bus di campo. Non ha bisogno di un chip e di un hardware dedicato e utilizza solo componenti standard disponibili in commercio, il che garantisce il minor costo dei prodotti;
- Semplice ed efficiente: Il formato frame ModBus è il protocollo più semplice e compatto. Gli utenti e i fornitori possono scaricare vari programmi di esempio, controlli e strumenti software dal sito web di ModBus-IDA e da altri siti web di terzi. Anni di esperienza sul campo dimostrano che ModBus ha una capacità di comunicazione sicura.

I dispositivi ModBus comunicano utilizzando un modello master-slave: un dispositivo, il master, può avviare transazioni (chiamate queries), che possono essere indirizzate a singoli slave (dispositivi di campo) o trasmesse a tutti gli slave. Gli slave eseguono le azioni specificate dalla query o restituiscono al master i dati richiesti (Hersent et al., 2011).

Il protocollo ModBus ha due varianti principali, ModBus Serial e ModBus TCP. Nel protocollo ModBus Serial, i messaggi vengono trasmessi tra un master e gli slave su linee seriali utilizzando le modalità di trasmissione ASCII²⁵ o RTU²⁶. Il protocollo ModBus TCP, più recente, fornisce connettività all'interno di una rete ModBus (master e relativi slave) e per reti ModBus interconnesse via IP (più master, ciascuno dei quali comunica con set di slave eventualmente sovrapposti). La variante TCP consente a un master di avere più transazioni in sospeso e permette a uno slave di impegnarsi in comunicazioni simultanee con più master (Hui et al., 2012).

2.5.4.1 Protocollo ModBus Serial

I messaggi del protocollo ModBus Serial vengono trasmessi tra un dispositivo master e uno slave su linee seriali utilizzando le modalità di trasmissione ASCII o RTU. I messaggi hanno

²⁵ ASCII sta per American Standard Code for Information Interchange ed è un codice di caratteri a 7 bit utilizzato per rappresentare testo in informatica. Nel contesto dei protocolli di comunicazione, ASCII è utilizzato come formato di trasmissione per scambiare informazioni tra dispositivi di controllo e di monitoraggio.

²⁶ RTU sta per Remote Terminal Unit ed è un protocollo di comunicazione seriale utilizzato per lo scambio di dati tra dispositivi di controllo e monitoraggio, come ad esempio per controllare i sensori in un sistema di automazione industriale. Il protocollo RTU è noto per la sua alta affidabilità e la sua capacità di lavorare su distanze relativamente lunghe. Inoltre, il protocollo RTU utilizza un formato di dati binario, che lo rende più efficiente in termini di velocità di trasmissione rispetto ad altri formati di dati.

tre componenti:

- indirizzo dello slave;
- unità dati del protocollo applicativo ModBus (PDU);
- un campo di controllo degli errori.

L'indirizzo dello slave in un messaggio di richiesta identifica il destinatario; l'indirizzo corrispondente in un messaggio di risposta identifica lo slave che risponde.

La PDU Modbus ha due campi, un codice funzione a un byte e parametri funzione (massimo 252 byte). Il campo del codice funzione consiste in un messaggio di richiesta che specifica l'operazione richiesta dal master; il campo corrispondente nel messaggio di risposta è utilizzato per trasmettere informazioni sullo stato al master (ad esempio, informazioni sugli errori quando si verifica un'eccezione nel dispositivo slave). I codici funzione ModBus specificano le operazioni di lettura e scrittura sugli slave, le funzioni diagnostiche e le condizioni di errore. Il campo dei parametri della funzione contiene dati relativi all'invocazione della funzione (messaggi di richiesta) o ai risultati della funzione (messaggi di risposta). I messaggi di risposta hanno la stessa struttura dei messaggi di richiesta. La specifica Modbus definisce risposte positive e negative ai messaggi di richiesta. Una risposta positiva informa il master che lo slave ha eseguito con successo l'azione richiesta; in questo caso, il codice funzione del messaggio di richiesta è incluso nel messaggio di risposta. Una risposta negativa o di eccezione notifica al master che la transazione non ha potuto essere eseguita dallo slave indirizzato.

2.5.4.2 Protocollo ModBus TCP

Il protocollo Modbus TCP fornisce la connettività all'interno di una rete Modbus basata su LAN (un master e i suoi slave), nonché per le reti Modbus interconnesse via IP (più master, ciascuno con più slave). Modbus TCP estende la sua controparte seriale consentendo a un master di avere più transazioni in corso e a uno slave di impegnarsi in comunicazioni simultanee con più master (Huitsing et al., 2008).

2.5.5 DALI

DALI è un protocollo di comunicazione standard per il controllo dell'illuminazione. L'interfaccia e il protocollo sono stati definiti dalla Commissione Elettrotecnica Internazionale come standard IEC60929/EN 60929 e modificati dallo standard IEC 62386. DALI-2 si riferisce alla versione più recente del protocollo DALI. Per DALI-2 lo standard IEC 62386 è stato ricostruito alla fine del 2014 per includere molti miglioramenti e nuovi comandi e funzioni. La maggior parte degli attuali alimentatori digitali e altri dispositivi elettronici per l'illuminazione (ad esempio, interruttori di potenza, sensori e rilevatori, trasformatori, ecc.) implementa il protocollo DALI. Ciò è dovuto alla sua semplicità di cablaggio e alle esigenze di comunicazione, basate fondamentalmente su due fili per la trasmissione dei segnali di controllo per la messa in funzione o per altri scopi di manutenzione (Adam, 2019).

Il protocollo DALI si basa sul modello master/slave, in cui un master può controllare fino

a 64 slave. Il master invia frame (messaggi forward) a qualsiasi dispositivo slave del sistema e riceve un frame di risposta (messaggio backward) se il frame forward ha richiesto una risposta. Un frame master-slave forward (ballast) è composto da 19 bit, così distribuiti: un bit iniziale, otto bit per l'instradamento, altri otto bit per i dati e due bit di stop. Nel frattempo, un frame backward di risposta è composto da 11 bit, un bit di avvio, 8 bit per i dati e due bit di stop. Al livello fisico, DALI utilizza una velocità di trasferimento dati effettiva di 1,2 kb/s e una tolleranza nella temporizzazione (Bellido-Outeiriño et al., 2016).

Lo scopo principale del protocollo DALI-2 è quello di stabilire un sistema di rete di lampade indirizzabili per le apparecchiature di illuminazione dello spazio e di effettuare un controllo automatico casuale delle apparecchiature. Questo migliora il metodo tradizionale che prevede l'utilizzo di circuiti fisici per collegare l'illuminazione, in cui le luci possono essere solo accese o spente simultaneamente e non possono essere controllate in modo indipendente. Per ottenere questa funzione, è stato creato un circuito logico che possiede circuiti fisici virtuali, in modo che l'illuminazione possa essere controllata in modo indipendente. In questo modo è possibile controllare l'illuminazione in diverse combinazioni, a seconda delle esigenze. Il protocollo DALI-2 è una versione estesa del protocollo DALI-1 e della nuova architettura di sistema. Il nuovo bus DALI supporta l'alimentazione elettrica e la comunicazione. Oltre a fornire energia per l'illuminazione, può anche fornire un host di controllo dell'applicazione (ACH) e l'illuminazione (Pu & Tsai, 2021).

3 BACNET

BACnet è un protocollo di comunicazione neutrale per le reti di automazione e controllo degli edifici. BACnet stabilisce una serie di regole che disciplinano le modalità di comunicazione dei dispositivi. Grazie alla sua standardizzazione, i dispositivi BACnet possono interagire indipendentemente dal produttore.

Più che un protocollo di livello applicativo, BACnet è una pila di protocolli a quattro livelli che si rifà al modello OSI. I livelli fisico e di collegamento dati consentono l'uso di diversi protocolli per adattarsi a diversi ambienti. Il desiderio di poter utilizzare il protocollo Internet (IP) è stato riconosciuto fin dall'inizio e nel 1999 è stato finalizzato "BACnet/IP". Lo stack di protocolli è stato ampliato con un "BACnetVirtual Link Layer" (BVLL) che consente ai protocolli sottostanti, come lo User Datagram Protocol over IP, di essere utilizzati come se fossero di per sé un livello di collegamento dati. Pertanto, le reti IP sono ora supportate in modo nativo dal livello di rete BACnet esistente, il che consente ai dispositivi BACnet di comunicare utilizzando direttamente l'IP, anziché tramite router di tunneling, come era stato specificato nello standard originale. Il livello di rete consente l'interconnessione di due o più reti BACnet. Il livello applicativo è responsabile dell'effettivo scambio di dati tra i dispositivi BACnet. Gli oggetti, le proprietà e i servizi BACnet svolgono un ruolo fondamentale nel livello applicativo. (Esquivel-Vargas et al., 2017; Kastner et al., 2005).

3.1 Oggetti BACnet

BACnet utilizza un "modello a oggetti" per rappresentare il funzionamento dei sistemi di automazione e controllo degli edifici (BACS). Indipendentemente dalle modifiche che nel tempo possono essere apportate al resto di BACnet, il suo modello a oggetti probabilmente sopravviverà più o meno così com'è. Si tratta di un modello in cui il funzionamento dei dispositivi BACS viene "mappato" in una serie di collezioni di attributi standardizzati. Se si pensa a dove si trovava il settore nel 1987, ogni produttore aveva sviluppato controllori digitali diretti e tutti facevano più o meno le stesse cose. Ma ognuno svolgeva il proprio lavoro interno in modo diverso. La sfida per l'SPC 135P, il comitato BACnet originale, è stata quella di trovare un modo per rappresentare il funzionamento di questi dispositivi in un modo comune e standard. All'epoca, la "programmazione orientata agli oggetti" stava facendo il suo debutto e si decise di sfruttare, almeno in parte, questo approccio orientato agli oggetti.

Quindi un "oggetto" in BACnet è solo una collezione di informazioni che si riferisce al funzionamento di un particolare dispositivo BACS. La raccolta di informazioni è un insieme di "proprietà". Ogni proprietà ha un identificatore, un tipo di dati (ad esempio, analogico, binario, testo o altro) e un codice di conformità che indica se la sua presenza è obbligatoria o facoltativa e se è di sola lettura o può essere scritta, cioè modificata, dai servizi BACnet. Tutti i tipi di oggetto devono avere le proprietà `Object_Identifier`, `Object_Name` e `Object_Type`.

Vale la pena di menzionare una sottigliezza. Lo standard definisce i "tipi di oggetto". Le istanze dei tipi di oggetto nei dispositivi reali sono quelle che vengono propriamente chiamate

"oggetti". I tipi di oggetto indicano quali proprietà può avere un oggetto. Le proprietà di un oggetto contengono i valori effettivi delle proprietà date come implementate.

Gli oggetti risolvono il problema di rappresentare le funzioni di un dato dispositivo BACnet in modo standard e visibile in rete. Ogni oggetto è identificato in modo univoco all'interno del dispositivo che lo gestisce tramite la proprietà `Object_Identifier`. La combinazione di un identificatore di oggetto univoco a livello di rete per il dispositivo e di un identificatore di oggetto univoco all'interno del dispositivo per ciascun oggetto consente di accedere all'oggetto in modo univoco o di "indirizzarlo" attraverso la rete. La conoscenza dei possibili "identificatori di proprietà" per ogni oggetto consente di leggere ed eventualmente scrivere il valore della proprietà. L'insieme di una serie di oggetti è chiamato "dispositivo BACnet".

Il modello di oggetti BACnet può essere facilmente esteso per includere nuovi oggetti o proprietà, se necessario. Questo può essere fatto da qualsiasi implementatore senza ottenere l'approvazione di nessuno e tali nuove funzionalità non interferiranno con estensioni simili fatte da altri, a condizione che l'implementatore faccia uso del suo "vendor ID", disponibile gratuitamente presso ASHRAE (Kastner et al., 2005; Newman, 2013).

BACnet definisce 18 tipi di oggetti standard, elencati nella Tabella 1. L'elenco è da considerarsi completo; ogni elemento di un sistema completo di controllo degli edifici è rappresentato da uno o più Oggetti, che si tratti di un Ingresso Analogico per un sensore, di una Programmazione per la programmazione o di una Classe di notifica per la distribuzione degli allarmi.

Lo standard BACnet non richiede tutti gli Oggetti in tutti i dispositivi BACnet. Un dispositivo che controlla una scatola VAV probabilmente avrà diversi Oggetti di ingresso analogico e di uscita analogica, mentre una workstation Windows® che non ha né ingressi di sensore né uscite di controllo non li avrà.

Ogni dispositivo BACnet deve avere un Oggetto dispositivo, le cui proprietà descrivono completamente il dispositivo BACnet alla rete. La proprietà `Object_List` dell'oggetto Dispositivo, ad esempio, fornisce un elenco di tutti gli oggetti contenuti nel dispositivo BACnet. Le proprietà `Vendor_Name`, `Vendor_Identifier` e `Model_Name` forniscono il nome del produttore e il modello del dispositivo (Swan, 2022).

Tabella 1 Oggetti BACnet standard. (Swan, 2022)

OBJECT	EXAMPLE OF USE
Analog Input	Sensor input
Analog Output	Control output
Analog Value	Setpoint or other analog control system parameter
Binary Input	Switch input
Binary Output	Relay output
Binary Value	Binary (digital) control system parameter
Calendar	Defines a list of dates, such as holidays or special events, for scheduling.
Command	Writes multiple values to multiple objects in multiple devices to accomplish a specific purpose, such as day-mode to night-mode, or emergency mode.
Device	Properties tell what objects and services the device supports, and other device-specific information such as vendor, firmware revision, etc.
Event Enrollment	Describes an event that might be an error condition (e.g., "Input out of range") or an alarm that other devices to know about. It can directly tell one device or use a Notification Class object to tell multiple devices.
File	Allows read and write access to data files supported by the device.
Group	Provides access to multiple properties of multiple objects in a read single operation.
Loop	Provides standardized access to a "control loop."
Multi-state Input	Represents the status of a multiple-state process, such as a refrigerator's On, Off, and Defrost cycles.
Multi-state Output	Represents the desired state of a multiple-state process (such as It's Time to Cool, It's Cold Enough and it's Time to Defrost).
Notification Class	Contains a list of devices to be informed if an Event Enrollment object determines that a warning or alarm message needs to be sent.
Program	Allows a program running in the device to be started, stopped, loaded and unloaded, and reports the present status of the program.
Schedule	Defines a weekly schedule of operations (performed by writing to specified list of objects with exceptions such as holidays. Can use a Calendar object for the exceptions.

3.2 Proprietà oggetti BACnet

Lo standard BACnet identifica 123 diverse proprietà degli oggetti. Un sottoinsieme diverso di queste proprietà è specificato per ogni tipo di oggetto. La specifica BACnet richiede che alcune Proprietà siano presenti per ogni Oggetto; altre Proprietà specificate sono opzionali. In entrambi i casi, le proprietà implementate hanno comportamenti specifici definiti dalla specifica, in particolare quelle coinvolte nelle notifiche di allarme o di evento e quelle che hanno un effetto sui valori o sugli stati di controllo.

Alcune delle proprietà standard devono essere scrivibili secondo le specifiche BACnet, mentre altre possono essere scrivibili a discrezione del produttore. Tutte possono essere lette in rete.

BACnet consente ai fornitori di aggiungere proprietà proprietarie ma, come per gli oggetti proprietari, le proprietà proprietarie potrebbero non essere comprese o accessibili da apparecchiature di altri produttori.

Uno degli oggetti BACnet standard è l'oggetto Ingresso analogico, che rappresenta un ingresso di sensore analogico come un termistore. La Figura 2.7 mostra un diagramma di un oggetto di ingresso analogico come potrebbe essere visto sulla rete attraverso cinque delle sue proprietà. Alcune proprietà, come Description, Device_Type e Units, vengono impostate durante l'installazione. Altre, come Present_Value e Out_Of_Service, forniscono lo stato dell'ingresso del sensore rappresentato dall'Oggetto ingresso analogico. Altre ancora (un Oggetto Ingresso Analogico può avere fino a 25 Proprietà) possono essere impostate dal produttore dell'apparecchiatura. Tutte possono essere lette; in questo esempio, una query sulla proprietà Present_Value di questo Oggetto di ingresso analogico otterrebbe la risposta "68.0".

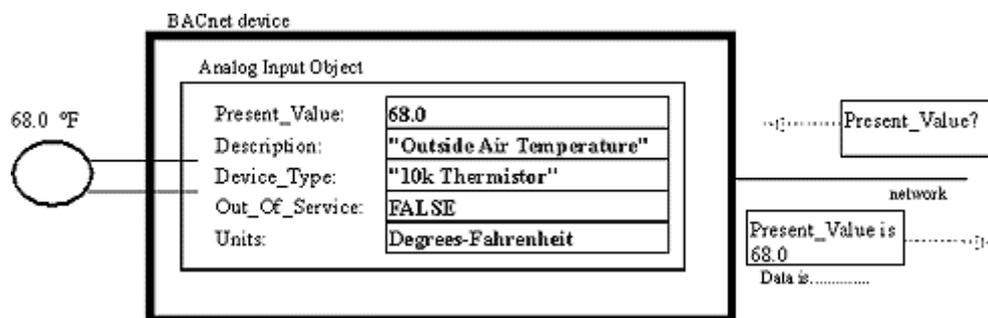


Figura 2.7 Un oggetto di ingresso analogico. (Swan, 2022)

L'Oggetto Ingresso analogico è rappresentativo degli Oggetti coinvolti direttamente con gli elementi di controllo e molte delle sue Proprietà riflettono questa caratteristica. La Tabella 2 elenca le proprietà definite dell'Oggetto Ingresso Analogico, insieme a valori tipici o di esempio per ciascuna proprietà. Ad esempio, le proprietà Status_Flags, Event_State, Reliability, Out_Of_Service, Min_Pres_Value, Max_Pres_Value, Notification_Class, High_Limit, Low_Limit, Limit_Enable, Event_Enable, Acked_Transitions e Notify_Type si occupano di rilevare condizioni insolite e possibilmente pericolose sul sensore e di generare le notifiche orali appropriate in risposta.

Le prime tre proprietà elencate in tabella 2 - Object_Identifier, Object_Name e Object_Type - devono essere presenti in ogni oggetto di un dispositivo BACnet.

L'Object_Identifier è un codice a 32 bit che identifica il tipo di oggetto (identificato anche dalla proprietà Object_Type) e il suo numero di "Istanza", che insieme identificano in modo univoco l'oggetto all'interno del dispositivo BACnet. L'Object_Name è una stringa di testo che ha una capacità unica. I dispositivi BACnet possono trasmettere le query per i dispositivi

che contengono Oggetti con un Object_Name specifico. Ciò può semplificare notevolmente l'impostazione del progetto.

Tabella 2 Proprietà di un Oggetto Ingresso Analogico.(Swan, 2022)

PROPERTY	BACnet	EXAMPLE
Object_Identifier	Required	Analog Input #1
Object_Name	Required	" AI 01 "
Object_Type	Required	Analog Input
Present_Value	Required	68.0
Description	Optional	" Outside Air Temperature "
Device_Type	Optional	" 10k Thermistor "
Status_Flags	Required	In_Alarm, Fault, Overridden, Out_Of_Service flags
Event_State	Required	Normal (plus various problem-reporting states)
Reliability	Optional	No_Fault_Detected (plus various fault conditions)
Out_Of_Service	Required	False
Update_Interval	Optional	1.00 (seconds)
Units	Required	Degrees-Fahrenheit
Min_Pres_Value	Optional	-100.0 , minimum reliably read value
Max_Pres_Value	Optional	+300.0 , maximum reliably read value
Resolution	Optional	0.1
COV_Increment	Optional	Notify if Present_Value changes by increment: 0.5
Time_Delay	Optional	Seconds to wait before detecting out-of-range: 5
Notification_Class	Optional	Send COV notification to Notification Class Object: 2
High_Limit	Optional	+215.0 , Upper normal range
Low_Limit	Optional	-45.0 , Lower normal range
Deadband	Optional	0.1
Limit_Enable	Optional	Enable High-limit-reporting, Low-limit-reporting.
Event_Enable	Optional	Enable To_Offnormal, To_Fault, To_Normal change reporting.
Acked_Transitions	Optional	Flags indicating received acknowledgments for above changes.
Notify_Type	Optional	Events or Alarms

BACnet richiede la presenza di un Oggetto dispositivo in ogni dispositivo BACnet. L'Oggetto dispositivo rende disponibili agli altri dispositivi della rete le informazioni relative al dispositivo e alle sue capacità. Prima che un dispositivo BACnet inizi le comunicazioni relative ai controlli con un altro, deve ottenere alcune delle informazioni presentate dall'Oggetto dispositivo dell'altro dispositivo. La Tabella 3 fornisce un esempio di Oggetto dispositivo per un controllore VAV a doppio condotto BACnet. Sebbene l'elenco delle proprietà sia imponente, la maggior parte di esse è fissata dal produttore e può essere letta solo da altri dispositivi BACnet.

A differenza di altri oggetti, il numero di istanza dell'oggetto dispositivo deve essere unico in tutta la rete BACnet, perché viene utilizzato per identificare in modo univoco i dispositivi BACnet. Può essere utilizzato per identificare comodamente il dispositivo BACnet da altri dispositivi durante l'installazione.

Tabella 3 Proprietà di un Oggetto Dispositivo. (Swan, 2022)

PROPERTY	BACnet	EXAMPLE
Object_Identifier	Required	Device #1076
Object_Name	Required	"Office 36 DD Control"
Object_Type	Required	Device
System_Status	Required	Operational (plus others)
Vendor_Name	Required	"Alerton Technologies, Inc."
Vendor_Identifier	Required	Alerton
Model_Name	Required	"VAV-DD Controller"
Firmware_Revision	Required	"1.0"
Application_Software_Version	Required	"Dual-Duct DDC"
Location	Optional	"Office 36, Floor 3"
Description	Optional	"(on network 5)"
Protocol_Version	Required	1 (BACnet protocol version)
Protocol_Conformance_Class	Required	2
Protocol_Services_Supported	Required	readProperty, writeProperty, atomicWriteFile,...
Protocol_Object_Types_Supported	Required	Analog Input, Analog Output,...
Object_List	Required	Analog Input #1, Analog Input #2, ...
Max_APDU_Length_Supported	Required	50 (bytes or characters)
Segmentation_Supported	Required	No
VT_Classes_Supported	Optional	n/a
Active_VT_Sessions	Optional	n/a
Local_Time	Optional	12:30:15.22
Local_Date	Optional	Tuesday, March 12, 1996
UTC_Offset	Optional	+480 (minutes from GMT/UTM)
Daylight_Savings_Status	Optional	False (not in effect)
APDU_Segment_Timeout	Optional	n/a
APDU_Timeout	Required	3000 milliseconds
Number_Of_APDU_Retries	Required	0
List_Of_Session_Keys	Optional	n/a
Time_Synchronization_Recipients	Optional	n/a
Max_Master	Optional	n/a
Max_Info_Frames	Optional	n/a
Device_Address_Binding	Required	None

3.3 Servizi BACnet

I servizi BACnet si riferiscono ad azioni specifiche che i dispositivi possono gestire: leggere la proprietà, scrivere la proprietà, inizializzare il dispositivo e scrivere il file atomico sono alcuni esempi di servizi BACnet.

I servizi sono il mezzo con cui un dispositivo BACnet acquisisce informazioni da un altro dispositivo, comanda a un altro dispositivo di eseguire alcune azioni o annuncia a uno o più dispositivi il verificarsi di un evento. Ciascuna richiesta di servizio emessa e la ricevuta di servizio (risposta) restituita diventa un pacchetto di messaggi trasferiti in rete dal dispositivo di invio a

quello di ricezione.

Un "programma applicativo" in esecuzione sul dispositivo BACnet emette le richieste di servizio e le elabora al momento della ricezione. Il programma applicativo è il software che esegue le operazioni del dispositivo. Nel caso di una postazione di lavoro dell'operatore, il software potrebbe mantenere una visualizzazione di diversi ingressi di sensori per l'operatore ed emettere periodicamente richieste di servizio agli oggetti appropriati nei dispositivi di destinazione per ottenere il valore più recente degli ingressi. Nel dispositivo monitorato, la richiesta di servizio verrebbe elaborata nel suo programma applicativo e la risposta contenente i dati richiesti verrebbe restituita.

BACnet definisce 32 servizi e li classifica in cinque categorie. Queste categorie di servizi sono i servizi Allarmi ed eventi, Accesso ai file, Accesso agli oggetti, Gestione dei dispositivi remoti e Terminale virtuale. Per ciascuno dei servizi "Confermati" (è prevista una risposta, tipicamente con dati), etichettati con "C" nelle tabelle seguenti, il dispositivo BACnet può avere la capacità di avviare la richiesta di servizio, o la capacità di elaborare e rispondere a una richiesta ricevuta di quel tipo, o entrambe. Per ciascuno dei servizi "Non confermati" (non è prevista alcuna risposta), etichettati con "U" nelle tabelle seguenti, il dispositivo BACnet può avere la capacità di avviare la richiesta di servizio, o la capacità di elaborare una richiesta ricevuta di quel tipo, o entrambe. BACnet definisce 32 servizi e li classifica in cinque categorie. Queste categorie di servizi sono i servizi Allarmi ed eventi, Accesso ai file, Accesso agli oggetti, Gestione dei dispositivi remoti e Terminale virtuale.

I dispositivi BACnet non sono tenuti a implementare ogni singolo servizio. Un solo servizio, ReadProperty, è richiesto per essere elaborato da tutti i dispositivi BACnet. A seconda della funzione e della complessità del dispositivo, possono essere avviati o eseguiti altri servizi.

I servizi Allarme ed Evento, riportati in tabella 4, si occupano dei cambiamenti delle condizioni rilevate da un dispositivo BACnet, compresi gli allarmi. Allarmi ed eventi sono cambiamenti che potrebbero indicare problemi o condizioni di errore, come la lettura di un sensore al di fuori dell'intervallo normale o il ritorno al funzionamento normale ("Eventi"); oppure una variazione di una lettura (di un certo incremento rispetto al rapporto precedente)

definita "Cambiamento di valore" o COV²⁷.

Tabella 4 Servizi di Evento e Allarme.(Swan, 2022)

SERVICE	BACnet	DESCRIPTION
AcknowledgeAlarm	C	Used to tell sender of alarm that a human has seen the alarm.
ConfirmedCOVNotification	C	Tells subscribing devices of the COV that occurred in a property.
ConfirmedEventNotification	C	Used to tell sender of a possible error condition.
GetAlarmSummary	C	Requests from a device a list of "active alarms," if any.
GenEnrollmentSummary	C	Requests a list of "event" (possible error) generating objects.
SubscribeCOV	C	Sent by a device to request that it be told of COVs in an object.
UnconfirmedCOVNotification	U	Tells subscribing devices that a change has occurred to one or more properties of a particular object.

I servizi di accesso ai file in BACnet sono utilizzati per leggere e manipolare i file nei dispositivi BACnet. In BACnet, i file rappresentano gruppi di dati di lunghezza e significato arbitrari; non si riferiscono necessariamente ad alcun tipo di dispositivo di memorizzazione di massa. A ogni file accessibile in BACnet è associato un Oggetto file.

La parola "Atomico" nel nome del servizio significa semplicemente che può essere eseguita una sola operazione di lettura o scrittura alla volta. Gli altri tentativi di accesso al file durante un accesso falliscono o vengono rimandati.

Attualmente non esistono file standard definiti da BACnet; per definizione, tutti gli accessi ai file sono di proprietà del fornitore, sebbene BACnet abbia riservato i tipi di file EVENTLOG e VALUELOG per strutture di file da definire in un secondo momento.

I servizi di accesso agli oggetti forniscono i mezzi per leggere, modificare e scrivere le proprietà e per aggiungere e cancellare gli oggetti. Sono previsti più servizi per la lettura e la scrittura delle proprietà; lo scopo dei servizi più complessi (ReadPropertyMultiple e WritePropertyMultiple) è quello di combinare il maggior numero di letture o scritture delle proprietà degli oggetti all'interno di un dispositivo BACnet in un unico messaggio, riducendo così l'overhead di rete.

Il servizio ReadPropertyConditional Service fa un ulteriore passo avanti; il dispositivo che elabora la richiesta verifica ogni Property di riferimento in base ai criteri inclusi nella richiesta e restituisce il valore solo se i criteri sono soddisfatti.

Sebbene siano stati definiti i servizi CreateObject e DeleteObject, essi si applicano a un

²⁷ La segnalazione di COV è un'utile alternativa al polling ripetuto di un Oggetto per un valore monitorato. Un dispositivo che contiene un Oggetto monitorato potrebbe essere soggetto a congestione del traffico di rete se molti altri dispositivi lo stanno monitorando; la segnalazione COV gli consente di inviare notifiche quando si verifica un cambiamento.

insieme limitato di oggetti. Gli oggetti collegati a un dispositivo fisico, ad esempio, non saranno probabilmente né creabili né eliminabili. Gli oggetti Gruppo e Registrazione eventi, ed eventualmente l'oggetto File, saranno probabilmente i soggetti abituali dei servizi CreateObject e DeleteObject.

I servizi di accesso sono elencati nella tabella 5.

Tabella 5. Servizi di Accesso. (Swan, 2022)

SERVICE	BACnet	DESCRIPTION
AddListElement	C	Adds one or more items to a property that is a list.
RemoveListElement	C	Removes one or more items from a property that is a list.
CreateObject	C	Used to create a new instance of an object in the serving device.
DeleteObject	C	Used to delete a particular object in the serving device.
ReadProperty	C	Returns a value of one property of one object.
ReadPropertyConditional	C	Returns the values of multiple properties in multiple objects.
ReadPropertyMultiple	C	Returns the values of multiple properties of multiple objects.
WriteProperty	C	Writes a value to one property of one object.
WritePropertyMultiple	C	Writes values to multiple properties of multiple objects.

È già stato detto come i servizi coinvolgano tipicamente due ruoli, i client che inviano richieste e i server che rispondono. Per chiarire quali servizi possono essere inviati o ricevuti da diversi dispositivi, lo standard BACnet definisce i BIBB (BACnet Interoperability Building Blocks). I BIBB sono spesso indicati come acronimi con tre componenti: tipo, compito e capacità. Il tipo si riferisce a cinque ampie categorie di BIBB. Il compito specifica lo scopo della BIBB. DS-RP-A è un esempio di BIBB che sta per Data Sharing (tipo), Read Property (compito) e ruolo di client (capacità "A"). I dispositivi che implementano DS-RP-A possono inviare richieste di Read Property ad altri dispositivi. Un dispositivo con il BIBB complementare, ovvero DS-RP-B, sarebbe in grado di rispondere a tale richiesta (Esquivel-Vargas et al., 2017).

3.4 Classi di Conformità e Gruppi di Funzioni

Valutare le capacità di un dispositivo BACnet è potenzialmente un compito formidabile, data l'ampia scelta di oggetti, proprietà e servizi che possono essere implementati, nonché il fatto che non è necessario che ogni dispositivo BACnet abbia un'implementazione BACnet completa per svolgere il proprio compito. Il Comitato BACnet dell'ASHRAE ha riconosciuto questo problema e ha risposto con aiuti alla valutazione sotto forma di "Classi di conformità", "Gruppi di funzioni" e "Protocol Implementation Conformance Statement" (PICS), di cui si parla al paragrafo successivo.

Il protocollo BACnet definisce sei livelli di classi di conformità, ognuno dei quali specifica il sottoinsieme minimo di servizi implementati sul dispositivo. Il livello più basso, la Classe di conformità 1, richiede solo che il dispositivo BACnet contenga un Oggetto dispositivo e che sia

in grado di eseguire (rispondere a) una richiesta di servizio ReadProperty. Ogni livello successivo della classe di conformità aggiunge le richieste di servizio che devono essere eseguibili dal dispositivo, nonché le richieste di servizio che deve essere in grado di avviare. La Classe di conformità 6 richiede l'implementazione di 21 tipi di richieste di servizio (dei 32 complessivi), di cui 20 devono essere avviabili e 17 eseguibili. La Classe di conformità fornisce quindi una misura della capacità di comunicazione del dispositivo.

I gruppi di funzioni specificano una combinazione di oggetti e servizi necessari per svolgere determinate funzioni di automazione degli edifici. Sono specificati indipendentemente dalla Classe di conformità, sebbene l'implementazione di alcuni gruppi di funzioni conferisca automaticamente una Classe di conformità superiore a 1. I gruppi di funzioni specificati da BACnet sono elencati nella tabella 6, con brevi descrizioni.

Tabella 6. Gruppi di funzionalità. (Swan, 2022)

FUNCTION GROUP	DESCRIPTION
Clock	Capabilities generally associated with having a clock.
Hand-held Workstation	Hand-held or portable workstation capabilities.
Personal Computer Workstation	Main operator workstation capabilities.
Event Initiation	Detect and generate alarms and events.
Event Response	Ability to respond to alarms and events.
COV Event Initiation	Ability to initiate change-of-value notifications.
COV Event Response	Subscribe to and receive change-of-value notifications.
Files	Capability to read, write, upload and download files.
Reinitialize	Ability to be reinitialized from remote device.
Virtual Operator	Capable of providing operator side of virtual terminal session.
Virtual Terminal	Capable of providing server side of virtual terminal session.
Device Communications	DeviceCommunicationControl Service request execution supported.
Time Master	Able to initiate TimeSynchronization Service request.

3.5 PICS

Il "Protocol Implementation Conformance Statement", o "PICS", descrive le capacità BACnet di una particolare implementazione BACnet. Queste dichiarazioni sono importanti per gli sviluppatori nel collaudo e nella certificazione di un prodotto. Il documento PICS viene creato dal produttore per identificare la funzionalità BACnet di un prodotto. Il PICS per un prodotto specifico può essere richiesto al produttore o scaricato dal sito web BTL Listing.

I PICS hanno diversi utilizzi:

- Selezione del prodotto: I progettisti e i responsabili delle strutture utilizzano un PICS per determinare se un determinato prodotto ha la funzionalità BACnet corretta per soddisfare i requisiti necessari affinché il prodotto funzioni con altri prodotti in un

sistema di automazione degli edifici (BAS);

- Integrazione del sistema: I progettisti e i programmatori di sistemi di controllo possono utilizzare un PICS per determinare le funzionalità di interoperabilità BACnet disponibili in un prodotto;
- Test BTL: il PICS viene utilizzato dall'organizzazione di collaudo, in aggiunta alla Checklist BTL e all'EPICS, per determinare e confermare i test necessari per un prodotto.

Pertanto, al fine di facilitare al meglio le valutazioni dei dispositivi BACnet, la specifica BACnet fornisce anche una dichiarazione di conformità dell'implementazione del protocollo (PICS) standard, creata dal produttore, che fornisce dettagliatamente le opzioni implementate nel particolare dispositivo. Il PICS deve contenere tutte le informazioni presenti nell'allegato 1.

Una PICS è un documento scritto, creato dal produttore di un dispositivo, che identifica le opzioni specificate da BACnet che sono implementate nel dispositivo. Un PICS BACnet è considerato un documento pubblico, disponibile per l'uso da parte di qualsiasi soggetto interessato. Come minimo, un PICS BACnet deve fornire le seguenti informazioni:

- Informazioni di base che identificano il fornitore e descrivono il dispositivo BACnet;
- I blocchi di interoperabilità BACnet supportati dal dispositivo;
- Il profilo standardizzato del dispositivo BACnet a cui il dispositivo è conforme, se presente;
- Tutti i servizi applicativi non standard supportati, con l'indicazione per ciascun servizio se il dispositivo può avviare la richiesta di servizio, rispondere a una richiesta di servizio o entrambi;
- Un elenco di tutti i tipi di oggetti standard e proprietari supportati;
- Per ogni tipo di oggetto supportato:
 - o qualsiasi proprietà opzionale supportata;
 - o quali proprietà possono essere scritte utilizzando i servizi BACnet;
 - o se gli oggetti possono essere creati o cancellati dinamicamente utilizzando i servizi BACnet;
 - o eventuali restrizioni sull'intervallo di valori dei dati per le proprietà.
- Le opzioni di opzione del livello di collegamento dati, sia reali che virtuali, supportate;
- Se sono supportate le richieste segmentate;
- Se sono supportate le risposte segmentate.

BACnet è stato sviluppato per nove anni da un comitato composto da produttori, università, agenzie governative e società di consulenza, con l'obiettivo di produrre un protocollo veramente aperto che permettesse alle apparecchiature di diversi produttori di interagire in un sistema completo e integrato di controllo dell'automazione degli edifici. Il risultato è uno standard che definisce tutti gli elementi di comunicazione tra i dispositivi, dal linguaggio astratto degli oggetti e dei servizi fino alle reti LAN fisiche. Con la sua adozione come standard ANSI e l'interesse dimostrato da GSA e altri, si può affermare che BACnet indica la

strada per il futuro dei controlli di automazione degli edifici.

Sistemi di georeferenziazione indoor tramite tecnologia Bluetooth: possibili implementazioni BMS e BIM based.
Andreuzza Virginia

Capitolo Terzo

LA LOCALIZZAZIONE INDOOR E I METODI DI IDENTIFICAZIONE DEI DISPOSITIVI DOMOTICI

1 LA LOCALIZZAZIONE INDOOR

L'attività umana nell'ultimo secolo si è spostata sempre più in ambienti chiusi, e di conseguenza sono aumentate le richieste di servizi negli ambienti interni, come ad esempio la localizzazione indoor. È difficile, infatti, immaginare la nostra vita senza il supporto dei sistemi di posizionamento (LBS²⁸). Questi possono dividersi in due categorie: globali e locali.

Molti di noi hanno sfruttato durante un viaggio turistico la tecnologia GPS²⁹ per raggiungere mete sconosciute. Il GPS è un sistema di navigazione globale basato su satelliti che consente di ottenere un'informazione precisa circa la posizione e l'orario al quale un determinato ricevitore effettua la richiesta di localizzazione. Offre un'elevata precisione in scenari esterni ma, a causa dell'ostruzione dei materiali da costruzione, i GPS non possono funzionare negli ambienti chiusi, all'interno dei quali i segnali satellitari raggiungono il ricevitore con un livello di degradazione che rende l'accuratezza del posizionamento indoor insufficiente (Duong & Thi, 2021; Mendoza-Silva et al., 2019).

Dall'altra parte un sistema di posizionamento locale (Local Positioning System, LPS) è un sistema che fornisce informazioni sulla posizione di un oggetto o una persona all'interno di un ambiente ristretto, come un edificio o un'area specifica. Questi sistemi utilizzano solitamente tecnologie come i sensori di prossimità, i beacon o le reti di sensori per determinare la posizione relativa all'interno di un determinato spazio. L'LPS può essere utilizzato per scopi di navigazione, monitoraggio di risorse o tracciamento di oggetti all'interno di un ambiente circoscritto.

I recenti sviluppi dell'IoT hanno avviato alla richiesta sempre maggiore di tecnologie Indoor Positioning based Service (IPS). Le tecnologie più comunemente applicate per le soluzioni IPS sono: Zigbee, la Visible Light Communication (VLC), la banda ultra-larga (UWB), la Radio Frequency Identification (RFID) e la Near Field Communication (NFC), la rete Wi-Fi e il Bluetooth Low Energy.

Prima di passare alla trattazione delle tecnologie vere e proprie vale la pena analizzare

²⁸ Location-Based Service

²⁹ Global Positioning System

le metriche per cui un IPS viene valutato:

- *Accuratezza*: è uno dei parametri più considerati quando si parla di posizionamento indoor. L'accuratezza è il grado di conformità, o di vicinanza, tra una posizione stimata o misurata e la posizione reale di un soggetto o di un oggetto in un determinato momento;
- La *copertura* si riferisce alla portata dei segnali provenienti dalla tecnologia che supporta un IPS. Un'elevata copertura può tradursi nell'applicabilità dell'IPS a vaste aree utilizzando un numero ridotto di emettitori;
- La *complessità* si riferisce all'impegno richiesto per la costruzione, l'implementazione o la configurazione dell'hardware e del software dell'IPS;
- *Robustezza*: è la capacità del sistema di resistere a condizioni che vanno oltre quelle considerate nominali, in altre parole, la tolleranza del sistema ai guasti, ovvero la capacità del sistema di operare correttamente anche in assenza di uno dei segnali abitualmente usati per funzionare;
- La *scalabilità* si riferisce alla capacità del sistema di fornire il posizionamento per un gran numero di utenti in uno spazio nuovo, solitamente più grande, senza intaccare la performance;
- Il *costo* si riferisce a qualsiasi tipo di costo relativo ai dispositivi di posizionamento o all'infrastruttura richiesta;
- La *privacy* è legata alle restrizioni del sistema che evitano la raccolta di informazioni che possono essere utilizzate per identificare o tracciare gli utenti;
- Infine, quanto più bassi sono i *requisiti energetici*, tanto meglio è. Nei dispositivi degli utenti, un basso consumo energetico si traduce in un basso consumo della batteria. Per l'infrastruttura IPS, un basso consumo energetico può tradursi in un impegno minimo per la manutenzione, ad esempio, dei dispositivi a batteria.

1.1 Tecniche di localizzazione

Di seguito vengono esposte le tecniche di localizzazione più implementate nelle soluzioni IPS sopracitate:

- *Time of Arrival (TOA)*. Misura il tempo di arrivo del segnale da un emettitore, registrato dal ricevitore. Il TOA sfrutta semplicemente il tempo assoluto di trasmissione di un segnale da un singolo emettitore ad un ricevitore remoto ad una velocità nota per misurare la distanza del dispositivo dall'emettitore;
- *Time Difference of Arrival (TDOA)*. È simile al TOA. Misura le differenze nel tempo di arrivo dei segnali provenienti da emittenti diverse. Viene utilizzato per stimare le differenze di distanza tra i vari emettitori;
- *Time of Flight (TOF)*. Indica la misura del tempo impiegato da un oggetto, una particella o un'onda (acustica, elettromagnetica o di altro tipo) per percorrere una certa distanza in un mezzo determinato. Dalla misura del tempo è possibile ricavare la distanza percorsa, la velocità e altre grandezze;

- *Angle of Arrival (AOA)*. Si riferisce all'angolo con cui il segnale raggiunge il sensore. Con l'AOA la posizione del dispositivo che effettua la richiesta di localizzazione può essere trovata dall'intersezione di alcune coppie di angoli formati fra i trasmettitori presenti nel raggio della circonferenza che ha per centro il ricevitore;
- *Angle of Departure (AOD)*. Utilizza il campo di antenne per dirigere il segnale trasmesso in un determinato angolo;
- *Received Signal Strength (RSS)*. L'intensità del segnale trasmesso da un emettitore diminuisce con l'aumentare della distanza dall'emettitore, anche se il loro rapporto può essere influenzato dall'attenuazione e dall'interferenza. L'RSS è quindi basato sulla stima della potenza del segnale trasmesso, calcolata partendo dall'intensità percepita dall'antenna che riceve il segnale, al netto della perdita di intensità dovuta alla distanza dell'emettitore. L'indice che misura tale potenza viene chiamato RSSI.
- *Pedestrian Dead Reckoning (PDR)*. Il PDR fa affidamento su sensori integrati, come accelerometri e giroscopi, per raccogliere informazioni sui movimenti del corpo umano. Questi sensori registrano accelerazioni e angoli di rotazione, consentendo di calcolare i passi compiuti, la direzione di camminata e la distanza percorsa.

1.1.1 Tecnica della laterazione

Una volta raccolte le misurazioni attraverso le tecniche TOA, TDOA, TOF, AOA, AOD e l'RSS queste vengono raccolte ed elaborate da un algoritmo che determina la posizione del dispositivo. Esistono diversi approcci, i più noti consistono o nell'implementazione dell'algoritmo di laterazione o nella tecnica del fingerprinting. In questo paragrafo verrà trattata la prima tipologia.

Un concetto importante nell'ambito della laterazione è il path loss (perdita di percorso) che ci riferisce la diminuzione di segnale radiofrequenza mentre si propaga nello spazio. Il modello di path loss viene utilizzato nella laterazione, in cui partendo dall'indice RSSI, si perviene alla distanza dell'emettitore da un dispositivo ricevente attraverso la legge lognormale:

$$P(d) = P(d_0) - 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma$$

dove γ rappresenta l'esponente di perdita di percorso, $P(d_0)$ rappresenta l'RSS alla distanza di riferimento d_0 , $P(d)$ rappresenta l'RSS alla distanza tra il punto di accesso (AP) e il ricevitore, d , e X_σ rappresenta una variabile casuale gaussiana, con media zero, causata dallo shadow fading. Quindi:

$$d = d_0 \cdot 10^{\frac{P(d_0) - P(d)}{10\gamma}}$$

Il modello appena presentato funziona bene per ambienti esterni, ovvero per scenari

LOS³⁰; tuttavia, tale modello può essere impreciso per la stima della distanza in ambienti interni, poiché l'ambiente interno è complicato da riflessione, ombreggiamento e multipath. In realtà, i segnali wireless in ambienti chiusi sono costituiti da segnali LOS e NLOS³¹. Questi segnali possono avere parametri di propagazione diversi. Inoltre, è difficile differenziare i segnali LOS e NLOS negli ambienti interni. Pertanto, il modello lognormale teorico adattato da tutti i dati di addestramento potrebbe non funzionare bene sia per i segnali LOS che per quelli NLOS e risultare in grandi errori nella stima della distanza (Zhuang et al., 2016).

La laterazione è chiamata trilaterazione se si utilizzano tre distanze, mentre è chiamata multilaterazione nel caso in cui se ne utilizzino più di tre. Per quanto riguarda la trilaterazione, questa tecnica si basa sulla misurazione della distanza da almeno tre punti di riferimento noti, come stazioni di base o punti di accesso wireless. Ogni punto di riferimento viene associato a una posizione nota con coordinate. Dopo aver misurato l'intensità di una radiofrequenza, o il tempo di arrivo di un segnale da tre punti di riferimento noti, vengono create delle sfere intorno ad essi, l'intersezione dei raggi delle tre sfere porterà alla posizione del dispositivo. La figura 3.1 mostra come funziona la trilaterazione.

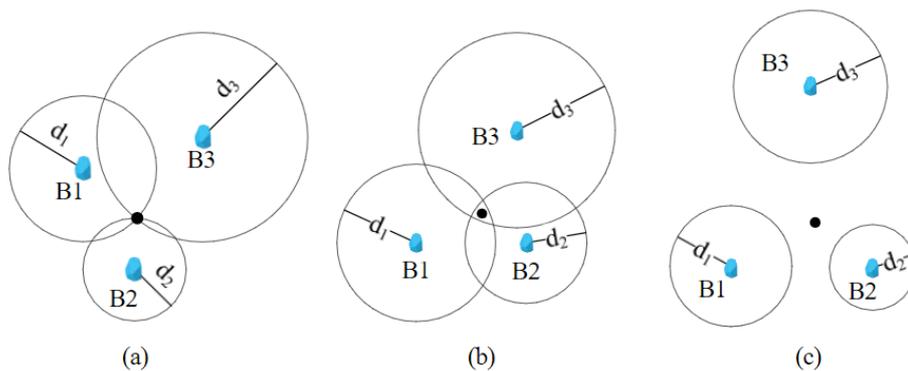


Figura 3.1 Metodo di trilaterazione (a) condizione ideale, 3 cerchi si intersecano in un punto, (b) e (c) condizione imperfetta, 3 cerchi non si intersecano in un punto. (Duong & Thi, 2021).

Allo stesso modo, partendo dagli angoli che il segnale dell'emettitore forma per arrivare al ricevitore (AOA o AOD), si può utilizzare la tecnica della triangolazione in maniera simile alla trilaterazione. Dunque, il procedimento è simile alla trilaterazione, ma invece di intersecare i raggi di tre sfere, viene determinata la posizione a partire dall'intersezione di tre linee di direzione di punti di riferimento. Il vantaggio nell'adozione di questa tecnica sta nel fatto che per ottenere un risultato attendibile in due dimensioni, sono sufficienti due coppie d'angoli, e tre per una misurazione tridimensionale.

³⁰ Line-of-Sight, ovvero la linea di vista.

³¹ Non-Line-of-Sight, ovvero il percorso di una radiofrequenza che ha incontrato ostacoli durante la propagazione o che ha subito fenomeni di rifrazione.

L'immagine 3.2 chiarisce il funzionamento della localizzazione tramite AOA.

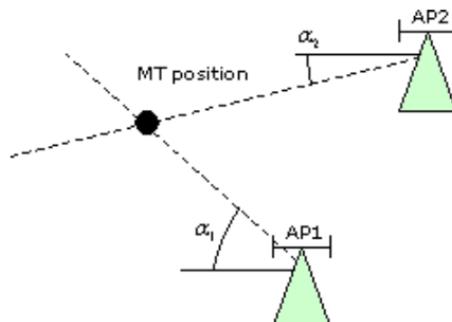


Figura 3.2 Localizzazione tramite AOA. (Marco Di Felice & Stivani Sessione, s.d.)

1.1.2 Il fingerprinting

Una volta misurato il segnale attraverso il metodo RSS, esistono due metodi di analisi: mappando le perdite di propagazione radio sulla distanza in base al modello di propagazione o mediante tecniche di *fingerprinting*.

Nel primo caso, come si è visto nel paragrafo precedente, si considera che il segnale sia trasmesso secondo il modello di propagazione e si ottiene la distanza trovandola e isolandola sul modello e risolvendo l'equazione. Lo svantaggio di questo metodo è che con la distanza da un solo punto di riferimento offre una precisione molto scarsa sulla localizzazione, anche se è possibile migliorarla stimando la distanza da più punti di riferimento e applicando tecniche di trilaterazione (Paterna et al., 2017). Si può poi migliorare l'accuratezza della misurazione attraverso l'utilizzo di filtri come, ad esempio, il filtro di Kalman³².

La tecnica *fingerprinting*, invece, sfrutta gli Access Point (AP) presenti all'interno dell'ambiente al fine di restituire la posizione di un dispositivo dotato di antenna. Si mappa dunque l'edificio e si indentificano gli AP e la loro intensità di segnale. In altre parole, per ciascun AP si traccia l'"impronta digitale" che viene poi memorizzata per creare una caratterizzazione dei segnali in quello scenario il più completa possibile. Il database raccolto è chiamato database di addestramento.

Il metodo *fingerprinting* si articola quindi in due fasi: la prima fase detta offline, o di apprendimento, nella quale l'ambiente viene suddiviso in Reference Points (RP) per i quali vengono effettuate una o più scansioni degli AP circostanti volte a costruire la mappa dell'ambiente, tale scansione viene poi elaborata e salvata nel database di addestramento; nella seconda fase, detta online, la posizione corrispondente alle nuove quantità di segnale

³² Il Filtro di Kalman è un algoritmo utilizzato per il filtraggio dei dati costruito sulla base di una media ragionata tra il prossimo valore predetto e il prossimo valore stimato. Questo filtro è spesso utilizzato per ottenere una migliore valutazione di un dato ottenuto dalla lettura di più sensori, ognuno caratterizzato da un rumore di misura avente caratteristiche differenti nel tempo (e quindi nella frequenza).

misurate viene stimata utilizzando le posizioni associate alle impronte memorizzate più simili rispetto alle nuove misurazioni.

La figura 3.3 rappresenta la tecnica di *fingerprinting*.



Figura 3.3 Fingerprinting. (Mendoza-Silva et al., 2019)

1.2 Tecnologie di localizzazione

Le tecnologie di localizzazione indoor stanno rivoluzionando il modo in cui ci orientiamo e ci muoviamo all'interno di edifici e spazi chiusi. Mentre il GPS è diventato uno strumento fondamentale per la geolocalizzazione all'aperto, il suo segnale satellitare è spesso debole o inaffidabile all'interno di edifici. È qui che entrano in gioco le tecnologie di localizzazione indoor, offrendo soluzioni precise e innovative per determinare la posizione all'interno di un ambiente.

Le tecnologie di localizzazione indoor trovano applicazione in una vasta gamma di settori. Negli ambienti aziendali, possono essere utilizzate per ottimizzare la gestione delle risorse, migliorare la sicurezza e semplificare la navigazione interna. Nell'ambito del commercio al dettaglio, consentono di offrire esperienze personalizzate e servizi di navigazione in negozio. Nei settori della salute e dell'ospitalità, possono aiutare a migliorare la precisione delle cure mediche e ad agevolare gli ospiti nelle strutture.

Il mondo dell'IPS si classifica in due tipologie di soluzioni in base alla necessità o meno dell'installazione di un'infrastruttura dedicata: la prima è chiamata soluzione basata sull'infrastruttura e la seconda soluzione senza infrastruttura.

La prima soluzione richiede l'installazione di un'infrastruttura specifica all'interno dell'ambiente in cui si desidera effettuare la localizzazione. Di solito, questa infrastruttura consiste in dispositivi come access point Wi-Fi, beacon o diffusori ultrasonici, che vengono collocati strategicamente nell'edificio o nello spazio. Le tecnologie basate su infrastruttura dedicata, come il Wi-Fi-based positioning system e il Bluetooth Low Energy (BLE), sfruttano i segnali emessi da questi dispositivi per determinare la posizione del dispositivo ricevente. Questi segnali vengono rilevati e misurati dal dispositivo ricevente (come uno smartphone) per calcolare la posizione approssimativa. Le principali vantaggi di queste tecnologie sono la precisione e la flessibilità nella definizione delle zone di localizzazione. Tuttavia, richiedono

un'installazione e una configurazione iniziale dell'infrastruttura dedicata, che può richiedere un certo sforzo in termini di costi e pianificazione.

Il secondo tipo di tecnologia non richiede un'infrastruttura specifica e sfrutta le risorse presenti nell'ambiente per determinare la posizione. Invece di fare affidamento su dispositivi installati appositamente, utilizza le caratteristiche dell'ambiente stesso per calcolare la posizione. I principali vantaggi di queste tecnologie sono la relativa facilità di implementazione, poiché non richiedono l'installazione di infrastrutture aggiuntive, e la possibilità di utilizzarle in ambienti in cui l'infrastruttura dedicata non è disponibile o non è praticamente fattibile. Tuttavia, possono essere meno precise rispetto alle tecnologie basate su infrastruttura dedicata e la loro efficienza dipende dalla presenza e dalla qualità delle risorse ambientali.

La necessità di installare infrastrutture aggiuntive, come access point o beacon, può richiedere un investimento significativo. Inoltre, la precisione delle tecnologie può variare a seconda delle condizioni ambientali e delle caratteristiche degli edifici. Ad ogni modo, nonostante queste sfide, le tecnologie di localizzazione indoor promettono di aprire nuove opportunità e migliorare la nostra esperienza all'interno degli edifici.

Le tecnologie odierne più importanti si collocano in entrambe le tipologie, con e senza infrastruttura di supporto, sono principalmente: le tecnologie a luce visibile (VLC) a o banda ultra-larga (UWB), i sistemi basati sull'identificazione a radiofrequenza (RFID) e NFC, i sistemi di posizionamento basati su Wi-Fi (WPS) e le soluzioni Bluetooth Low Energy (BLE). Queste tecnologie verranno affrontate nei paragrafi successivi.

1.3 Visible Light Communication (VLC)

La tecnologia VLC (Visible Light Communication), nota anche come "comunicazione tramite luce visibile", si riferisce a un metodo di trasmissione dati che sfrutta la luce visibile come mezzo di comunicazione. In sostanza, utilizza lampade o dispositivi che emettono luce visibile, come LED, per inviare informazioni.

La comunicazione a luce visibile (VLC) è una sottocategoria della comunicazione ottica senza fili (OWC³³) che illumina e trasmette simultaneamente dati utilizzando diodi a emissione luminosa (LED). Con molte caratteristiche positive come il costo, l'efficacia, la lunga durata, robustezza, compatibilità ambientale e grande controllabilità, i LED sono stati considerati il dispositivo di illuminazione per il XXI secolo (Do & Yoo, 2016; Razzaq & Abdullah, 2022).

Tale comunicazione si basa sul concetto di modulazione dell'intensità luminosa. In altre parole, variazioni controllate nell'intensità della luce emessa vengono utilizzate per trasmettere dati binari, come 1 e 0, che costituiscono le informazioni da comunicare. Questo processo avviene ad una velocità molto elevata, al di là della percezione umana; quindi, i cambiamenti

³³ Optical Wireless Communication

nell'intensità luminosa non sono visibili all'occhio umano.

Per inviare dati tramite VLC, il segnale luminoso modulato viene ricevuto da un dispositivo ricevente, come un'applicazione su uno smartphone o un apposito sensore VLC. Il dispositivo ricevente è dotato di un rilevatore di luce che interpreta le variazioni nell'intensità luminosa e le converte nuovamente in dati digitali comprensibili.

La tecnologia VLC può essere utilizzata in una varietà di contesti. Ad esempio, può essere utilizzata per la trasmissione di dati all'interno di un ambiente chiuso come uffici, centri commerciali o stadi, in cui sono presenti luci a LED. Può essere utilizzata anche per comunicazioni punto a punto tra dispositivi, come tra uno smartphone e una lampada VLC.

Oltre alla comunicazione dati, la tecnologia VLC può offrire ulteriori funzionalità, come la localizzazione indoor. Utilizzando più sorgenti di luce VLC strategicamente posizionate, è possibile determinare la posizione di un dispositivo in uno spazio fisico.

Per determinare la posizione di un dispositivo ci si serve di un ricevitore, il quale normalmente o è dotato di un array di fotodiodi che catturano l'intensità del segnale attraverso le tecniche di RSS, TDOA e AOA, altrimenti di una fotocamera che cattura le immagini del trasmettitore. Nel primo caso vengono poi implementati approcci di posizionamento come la laterazione, l'angolazione o il fingerprinting; nel secondo le coordinate che i LED hanno nell'immagine vengono tradotte in coordinate dell'ambiente, di solito utilizzando diverse immagini e hardware di supporto aggiuntivo come gli accelerometri (Mendoza-Silva et al., 2019).

Uno dei vantaggi principali della tecnologia VLC è che sfrutta una risorsa già presente nell'ambiente: la luce. Non richiede l'installazione di infrastrutture aggiuntive o l'uso di frequenze radio dedicate. Inoltre, essendo basata sulla luce visibile, può essere utilizzata in ambienti in cui l'uso di onde radio può essere limitato o interferire con altre apparecchiature.

Tuttavia, la tecnologia VLC presenta anche alcune sfide. La trasmissione dati tramite luce visibile richiede una linea di vista diretta tra il dispositivo trasmettente e il dispositivo ricevente, poiché la luce non può attraversare ostacoli solidi come muri. Inoltre, l'illuminazione ambientale può influire sulla qualità del segnale VLC; quindi, è necessario gestire adeguatamente la luminosità ambientale per garantire una trasmissione affidabile.

1.4 Ultra-WideBand (UWB)

La banda ultra-larga UWB è altamente riconosciuta come tecnologia IPS. Si basa su segnali che sfruttano una larga porzione dello spettro elettromagnetico e che, per definizione fornita dalla USA Federal Communications Commission (FCC), occupano più del 20% della frequenza portante centrale, o presentano una frequenza maggiore di 500 Mhz. La UWB è una tecnologia che si è evoluta nel corso degli anni ed è stata adottata in diversi settori, inclusi quelli delle comunicazioni wireless e della localizzazione precisa.

La caratteristica principale dell'UWB è la sua larghezza di banda molto ampia. Tale

ampiezza di banda è correlata a una caratteristica chiave che è riconosciuta in molti lavori: UWB funziona emettendo impulsi molto brevi con tempo preciso, di 200 ps, con una potenza di trasmissione molto bassa, nell'ordine di 10^{-12} secondi. La bassa potenza di trasmissione evita interferenze WiFi, BLE o simili.

La modulazione di impulso molto breve rende UWB quasi immune a problemi di rifrazione (multipath), in quanto nel tempo aggiuntivo che impiega una trasmissione rifratta per raggiungere il destinatario, la trasmissione in LOS è già stata ricevuta. Un altro vantaggio di questa tecnologia è che, sempre grazie all'elevata velocità di trasmissione, è possibile identificare la ricezione dei segnali che raggiungono l'antenna ricevente dopo aver effettuato dei rimbalzi su superfici intermedie (NLoS); questi segnali possono essere esclusi per limitare il rumore, rendendo così questo tipo di trasmissione una delle tecniche preferibili in ambienti il cui fenomeni di multipath sono preponderanti, come ad esempio all'interno di edifici.

La tecnologia UWB offre diversi vantaggi rispetto ad altre tecnologie di trasmissione wireless. Uno dei principali vantaggi è la capacità di fornire una precisione molto elevata nella localizzazione e nel tracciamento degli oggetti. L'UWB può misurare il tempo di volo del segnale tra i dispositivi con una precisione dell'ordine dei picosecondi, consentendo di calcolare con precisione la distanza tra i dispositivi. Questo rende l'UWB adatto per applicazioni di localizzazione indoor ad alta precisione, come il tracciamento di attività o oggetti all'interno di un ambiente.

Inoltre, come già detto, l'UWB offre una maggiore immunità alle interferenze rispetto ad altre tecnologie wireless. Poiché utilizza segnali a impulsi brevi e molto larghi, l'UWB ha una bassa potenza media, riducendo così la probabilità di interferire con altre apparecchiature e segnali radio esistenti. Ciò rende l'UWB una scelta adatta per ambienti complessi in cui le interferenze possono essere problematiche, come ospedali o impianti industriali.

Il posizionamento basato su dispositivi UWB richiede l'impiego di tag. Gli emettitori UWB vengono disposti in configurazioni fisse o mobili, a seguito viene calcolato sul dispositivo client, dotato di tag di dimensioni e forme diverse, il TOA, il TDOA, il AOA o l'RSS. Infine, viene calcolata la posizione attraverso le tecniche di laterazione, angolazione o fingerprinting. Dato l'impegno richiesto per la creazione della mappa radio per il fingerprinting, è il metodo meno utilizzato per l'UWB.

L'aspetto più interessante delle trasmissioni UWB è forse rappresentato dal fatto che la capacità di identificazione dei segnali multipath può essere sfruttata come una sorta di radar. È possibile inviare un segnale e attendere che questo sia riflesso da qualcosa nell'ambiente; nel momento in cui la trasmittente originale riceve il segnale di echo può calcolare, facendo la differenza tra il tempo di invio e quello di ricezione (TOA), la distanza a cui si trova l'oggetto che l'ha riflessa (Mendoza-Silva et al., 2019; Ranieri, 2021).

Le precisioni riportate sono tipicamente inferiori ai 50 cm, il che rende l'UWB

interessante per molte applicazioni, a patto che si possano permettere i tag UWB, sia in termini di costo che di requisiti applicativi. Tuttavia, la breve portata nominale dell'UWB e il costo delle apparecchiature UWB rendono la scalabilità un problema serio.

L'UWB può essere utilizzato in diverse applicazioni. Oltre alla localizzazione indoor ad alta precisione, può essere impiegato nel monitoraggio della presenza e del movimento di persone o oggetti, nella comunicazione wireless a corto raggio ad alta velocità, nel tracciamento di asset nel settore industriale e nell'automazione domestica intelligente.

È importante notare che l'UWB ha limitazioni e sfide da affrontare. La sua portata è limitata rispetto ad altre tecnologie wireless e può essere influenzata dall'ambiente circostante. Inoltre, la sua adozione è ancora in corso e potrebbe richiedere una diffusione più ampia di dispositivi compatibili per sfruttare appieno i suoi benefici.

1.5 Sistemi a radiofrequenza RFID e NFC

I sistemi IPS a radiofrequenza RFID si basano su tag elettronici che memorizzano alcuni dati - solitamente un ID - e un lettore capace di ottenere tramite radiofrequenza i dati di tali tag. Poiché i lettori sono solitamente più grandi e costosi dei tag, un'impostazione comune nell'IPS basato su RFID consiste nel distribuire un gran numero di tag in tutto l'ambiente e far sì che i lettori proseguano o si avvicinino ai soggetti di posizionamento.

I sistemi RFID possono essere classificati in attivi, passivi o semi-passivi a seconda che il tag abbia una propria fonte di energia. I tag attivi hanno batterie e trasmettono i loro dati periodicamente; i tag passivi utilizzano l'energia del segnale del lettore per trasmettere i loro dati; i tag semi-passivi trasmettono i loro dati solo dopo il rilevamento del segnale del lettore.

Esistono due diversi approcci per la localizzazione tramite RFID: il posizionamento basato su una singola cella e il posizionamento mediante multilaterazione. Seguendo il primo, verranno installati più tag RFID attivi in luoghi specifici di posizione nota, la localizzazione avverrà poi prendendo come riferimento il tag più vicino. Nel secondo approccio invece, il lettore dev'essere raggiunto dal segnale radio di almeno tre celle diverse, e dopo aver calcolato l'intensità del segnale con l'RSS, si procede con la localizzazione tramite l'algoritmo di triangolazione.

I sistemi RFID superano il problema del contatto visivo tra emettitore e ricevitore, risultando un ottimo metodo per la localizzazione indoor, ma rimangono sensibili ai problemi dovuti a multipath che vanno ad intaccare l'accuratezza del risultato.

Una variante dell'RFID è la tecnologia Near Field Communication (NFC), utilizzata per pagamenti o per rilevazioni a corto raggio. La tecnologia NFC è una forma di comunicazione wireless a corto raggio che consente lo scambio di dati tra dispositivi compatibili con NFC, come smartphone, tablet o altri dispositivi elettronici. La comunicazione NFC avviene tramite onde radio a frequenza molto bassa (13,56 MHz) e si basa sulla tecnologia RFID. Tuttavia, a differenza delle etichette RFID tradizionali che vengono lette da un lettore a distanze maggiori,

la tecnologia NFC opera a breve distanza, generalmente entro un raggio di quattro centimetri o meno. Questa vicinanza fisica è necessaria per l'iniziazione della comunicazione NFC.

I tag NFC – ovvero microcircuiti a cui sono assegnate informazioni come, ad esempio, un ID - permettono a due dispositivi di comunicare tra loro se in contatto o in prossimità. Il dispositivo lettore rileverà la presenza del tag del secondo il dispositivo e farà partire le operazioni ad esso associate.

I sistemi IPS hanno sfruttato la capacità NFC di molti smartphone in combinazione con l'implementazione di tag NFC in un ambiente. Tuttavia, tali sistemi hanno l'inconveniente di richiedere la partecipazione attiva del soggetto di posizionamento, cioè di un soggetto che avvicini lo smartphone al tag.

1.6 Wi-fi

A causa dell'ubiquità delle reti WiFi in ambienti interni, sono state proposte molte soluzioni che utilizzano segnali WLAN per fornire il posizionamento interno.

La tecnologia Wi-Fi (Wireless Fidelity) è una tecnologia di comunicazione wireless che consente il trasferimento di dati tra dispositivi tramite onde radio. È ampiamente utilizzata per la connessione a Internet e la trasmissione di dati senza fili in ambienti domestici, aziendali e pubblici.

Il WiFi funziona su 2,4 GHz e 5,0 GHz, con larghezze tipiche dei canali di 20 MHz, 40 MHz e 80 MHz. I segnali provenienti da bande di 2,4 GHz viaggiano più lontano, mentre quelli provenienti da bande di 5,0 GHz hanno canali più ampi e sono più resistenti.

La tecnologia Wi-Fi si basa sugli standard definiti dall'organizzazione IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Gli standard più comuni sono quelli appartenenti alla famiglia 802.11, come 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac e 802.11ax. Ogni standard offre diverse velocità di trasmissione, frequenze di operazione e capacità di penetrazione del segnale.

Elementi fondamentali della tecnologia Wi-Fi sono gli Access Point e i Router WiFi. Un access point (AP) è un dispositivo che agisce come punto di accesso centrale per una rete Wi-Fi. È collegato a una connessione Internet cablata e permette ai dispositivi wireless di connettersi alla rete tramite segnali radio. Gli access point possono supportare diverse generazioni di standard Wi-Fi e possono essere utilizzati sia in ambienti domestici che in ambienti aziendali o pubblici.

Un router Wi-Fi invece è un dispositivo che combina un router di rete con un access point Wi-Fi. È responsabile di instradare i dati tra la rete locale e la connessione Internet, consentendo ai dispositivi Wi-Fi di accedere a Internet. Un router Wi-Fi può anche offrire funzionalità di sicurezza, come la crittografia dei dati e la gestione degli accessi.

Esistono due metodi principali per la localizzazione WLAN: la laterazione che sfrutta

L’RSS e il fingerprinting. Le soluzioni per il posizionamento Wi-fi tramite RSS possono applicare la laterazione basata sul modello di propagazione se le posizioni degli AP sono noti. L’approccio più diffuso risulta però essere il fingerprinting che apporta maggiore accuratezza alla misurazione. Il fingerprinting, infatti, è meno soggetto al fenomeno del multipath e non soffre di attenuazioni di segnale causate da ostacoli. Infine, i sistemi Wi-fi IPS che utilizzano il fingerprinting hanno goduto di popolarità poiché risultano economici e facili da implementare.

Tuttavia, la tecnica fingerprinting si basa su un’infrastruttura che rende necessaria la predisposizione di AP nel caso questi non fossero già presenti e inoltre necessita del campionamento dei fingerprints durante la fase offline, ciò richiede tempo e costi aggiuntivi rispetto a sistemi che usano un approccio RSS. Infine, la precisione del risultato è scarsa, va dai 5 ai 15 metri se si utilizza il fingerprinting ed è aumentabile solo installando più AP, il che richiede un maggiore costo.

1.7 Bluetooth Low Energy (BLE)

Bluetooth Low Energy (BLE), anche noto come Bluetooth Smart, è una tecnologia wireless a corto raggio sviluppata per consentire la comunicazione tra dispositivi con un consumo energetico ridotto. È una versione del protocollo Bluetooth, una tecnologia di comunicazione senza fili ampiamente utilizzata per connettere dispositivi come telefoni cellulari, auricolari, altoparlanti, smartwatch e molti altri.

Il nome "Bluetooth" deriva da Harald Blåtand (in inglese Harald Bluetooth), un re vichingo danese che ha vissuto tra l'anno 910 e il 987 d.C. Blåtand, che significa "dente blu" in danese, era famoso per aver un dente che appariva blu.

Il nome "Bluetooth" è stato scelto come marchio per questa tecnologia perché l'obiettivo era quello di creare uno standard di comunicazione wireless che potesse unire dispositivi diversi, come computer, telefoni cellulari e periferiche, proprio come Harald Bluetooth aveva unificato diverse tribù scandinave sotto un unico regno. La scelta del nome Bluetooth è stata fatta da Jim Kardach, uno dei principali sviluppatori del progetto Bluetooth. Durante una sessione di brainstorming, Kardach ha suggerito il nome "Bluetooth" come riferimento alla storia di Harald Bluetooth e alla sua capacità di unire le persone. Il nome è stato accolto favorevolmente, in quanto rifletteva l'idea di creare un'interfaccia comune per la comunicazione senza fili tra dispositivi diversi.

La storia di Bluetooth Low Energy inizia nel 2001, quando Ericsson, un'azienda di telecomunicazioni svedese, ha introdotto il protocollo Bluetooth come standard di comunicazione wireless per dispositivi consumer.

Nel corso degli anni, Bluetooth si è evoluto e ha guadagnato popolarità come metodo di connessione affidabile per una vasta gamma di dispositivi. Tuttavia, nel 2004, l'idea di sviluppare una versione a basso consumo energetico del protocollo Bluetooth è stata introdotta da Nokia. L'obiettivo era creare una tecnologia che consentisse a dispositivi come

sensori, orologi e altri dispositivi a batteria di comunicare tra loro in modo efficiente e con una durata della batteria estesa. Questa nuova versione di Bluetooth è stata successivamente chiamata Bluetooth Low Energy.

Nel 2006, il Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG), un'organizzazione che supervisiona lo sviluppo e la promozione di Bluetooth, ha formato un gruppo di lavoro per sviluppare lo standard Bluetooth Low Energy. Nel 2010, la specifica dello standard Bluetooth 4.0 è stata rilasciata, introducendo ufficialmente il supporto per Bluetooth Low Energy. Questa specifica ha consentito la creazione di dispositivi Bluetooth dual mode, in grado di supportare sia il Bluetooth classico che il Bluetooth Low Energy.

Bluetooth Low Energy ha introdotto diverse caratteristiche chiave che lo distinguono dal Bluetooth classico. La principale differenza è il consumo energetico ridotto. Grazie a un'architettura a basso consumo energetico, i dispositivi Bluetooth Low Energy possono funzionare su batterie di dimensioni ridotte per mesi o addirittura anni.

Sebbene le soluzioni IPS Wi-fi siano diventate popolari, i dispositivi Bluetooth Low Energy (BLE) offrono un'alternativa a basso costo e a bassa potenza, tanto da essere diventati interessanti per i luoghi in cui non è presente un'infrastruttura Wi-fi. Il WiFi rende possibile la trasmissione di dati ad alta velocità; tuttavia, il tipo di dati tipicamente richiesti per un sistema di posizionamento non richiede un'elevata velocità di trasmissione; pertanto, i dispositivi BLE che offrono 1 Mbit/s per la trasmissione dei dati sono accettabili. Di conseguenza, BLE rappresenta un'opzione più economica e più efficiente dal punto di vista energetico per implementare applicazioni di rilevamento e posizione indoor-outdoor rispetto alle soluzioni WiFi (Paterna et al., 2017).

Nella sezione seguente si analizza più specificatamente ciò che concerne il Bluetooth Low Energy.

2 BLUETOOTH LOW ENERGY

BLE è il successore del precedente Bluetooth Classic, il cui obiettivo primario era fornire un'elevata velocità di trasmissione dei dati per le applicazioni di streaming audio e dati. Si discosta dal Bluetooth Classic per la bassa velocità di trasmissione dati che risulta efficiente dal punto di vista energetico e adatta ad applicazioni IoT a basso consumo. Sono proprio il basso consumo di energia, che consente ai beacon di funzionare a batteria per mesi, e il basso costo a rendere la tecnologia BLE la più adatta per la navigazione e il tracciamento per ambienti interni.

Il BLE è stato introdotto per la prima volta nel 2010 dal Bluetooth Special Interest Group (SIG) come parte della specifica Bluetooth 4.0, che ha definito l'architettura complessiva e i dettagli di implementazione di BLE. Da allora, ci sono state diverse revisioni delle specifiche di base del Bluetooth: Bluetooth 4.1, Bluetooth 4.2, Bluetooth 5.0 e Bluetooth 5.1. I principali miglioramenti apportati da queste revisioni riguardano la gestione della potenza, la velocità di trasmissione, la portata della comunicazione, la latenza e i problemi di sicurezza del BLE.

Bluetooth 4.0 vieta esplicitamente a una periferica di partecipare a più connessioni (o di assumere più ruoli) contemporaneamente con altri dispositivi centrali. Le versioni 4.1 e successive incorporano un cambiamento fondamentale per quanto riguarda i ruoli che ogni dispositivo può svolgere in presenza di connessioni multiple. In altre parole, un dispositivo, indipendentemente dal suo ruolo di Link Layer, può eseguire più istanze di Link Layer contemporaneamente senza limitazioni. Pertanto, la periferica può essere connessa simultaneamente a più di un dispositivo centrale.

La versione 4.2 introduce importanti miglioramenti: il payload massimo della PDU può arrivare a 255 byte, rispetto ai soli 31 byte delle versioni precedenti. Questa versione fornisce anche un supporto aggiuntivo per le funzionalità IoT, come l'IP a bassa potenza e il gateway Internet. In termini di sicurezza, in questa versione sono state introdotte le connessioni sicure LE, che utilizzano l'algoritmo ECD Halgorithm per la generazione delle chiavi, al fine di proteggere da MIT Attacks.

Il Bluetooth 5.0 è considerato un significativo balzo in avanti rispetto alle versioni precedenti, con affermazioni quali "due volte la velocità" e "quattro volte la portata". La versione 5.1 del Bluetooth, rilasciata di recente, apporta ulteriori miglioramenti alla latenza di connessione e ai servizi di localizzazione per supportare meglio i servizi di localizzazione indoor. Entrambe le versioni 5.0 e 5.1 sono state progettate per le applicazioni IoT, ad esempio utilizzando progetti di gestione dell'alimentazione più avanzati per massimizzare la durata dei dispositivi alimentati a batteria (Yang et al., 2020). Nel dicembre 2019 è stato poi introdotto Bluetooth 5.2 e nel 2021 la versione 5.3. Sebbene sia l'ultimo aggiornamento, il Bluetooth 5.3 deve ancora farsi strada nel mercato, a differenza delle versioni 5, 5.1 e 5.2 che invece sono ormai molto diffuse.

2.1 Differenze Bluetooth Classic e LE

Per comprendere a fondo il funzionamento di BLE è necessario trattare brevemente di Bluetooth Classic e delle differenze tra i due protocolli. La tecnologia Bluetooth, governata da Bluetooth SIG, è uno standard wireless per la comunicazione a corto raggio. Ha avuto successo poiché ha offerto un'alternativa affidabile alla comunicazione cablata tra dispositivi, per questo motivo la caratteristica energetica non è stata una considerazione primaria. In seguito, le richieste di dispositivi IoT a basso consumo hanno spinto Bluetooth SIG a inventare BLE, la prima versione a basso consumo di Bluetooth.

Bluetooth Classic e BLE operano nella stessa banda di frequenza ISM a 2,4 GHz, priva di licenza, ma mentre il primo utilizza 79 canali con spaziatura di 1 MHz, il secondo utilizza la gamma di frequenze da 2402 MHz a 2480 MHz, suddivisa in 40 canali, ciascuno con una spaziatura di 2 MHz; inoltre, BLE predilige tre canali primari per la trasmissione degli *advertisement*, rispettivamente il 37 (2,42 GHz), il 38 (2,426 GHz) e il 39 (2,48 GHz), i rimanenti vengono utilizzati per lo scambio di dati. L'ampia spaziatura dei canali riduce al minimo i segnali Wi-fi che operano nella stessa banda ISM.

La figura 3.4 mostra la suddivisione della banda di frequenza utilizzata da BLE.

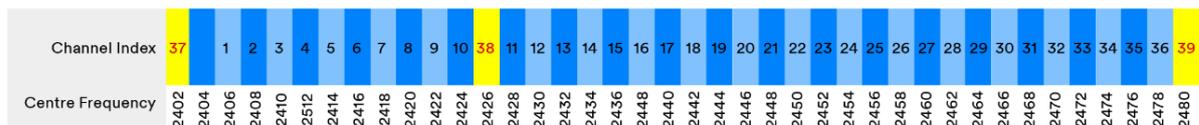


Figura 3.4 Canali BLE. (Bluetooth Low Energy – Regulatory Aspects Document (RAD) / Bluetooth® Technology Website, s.d.)

La tabella 7 mostra le principali differenze tra BLE e Bluetooth Classic, ma possono essere riassunte in tre punti principali:

- I due protocolli hanno scopi e applicazioni diverse. Bluetooth Classic è stato concepito per applicazioni multimediali, mentre BLE è destinato ad applicazioni IoT in cui è necessario trasmettere frequentemente brevi dati di sensori;
- I due protocolli sfruttano metodi di comunicazione wireless diversi. Come già detto, Bluetooth Classic è destinato allo streaming e richiede quindi l'accoppiamento tra dispositivi centrali e periferici. Nel BLE, tale operazione non è necessaria;
- Il Bluetooth Classic è una comunicazione uno-a-uno, mentre il BLE è una comunicazione uno-a-molti, dove l'uno è un dispositivo beacon BLE. Per garantire la coesistenza di entrambe le tecnologie, il Bluetooth SIG ha introdotto il Bluetooth Smart Ready, che è in grado di supportare entrambi i tipi di Bluetooth contemporaneamente ed è normalmente presente nei dispositivi con capacità computazionali superiori, come smartphone e computer.

Sistemi di georeferenziazione indoor tramite tecnologia Bluetooth: possibili implementazioni BMS e BIM based.
Andreuzza Virginia

L'immagine 3.5 riassume gli aspetti principali delle due tecnologie appena esposte.

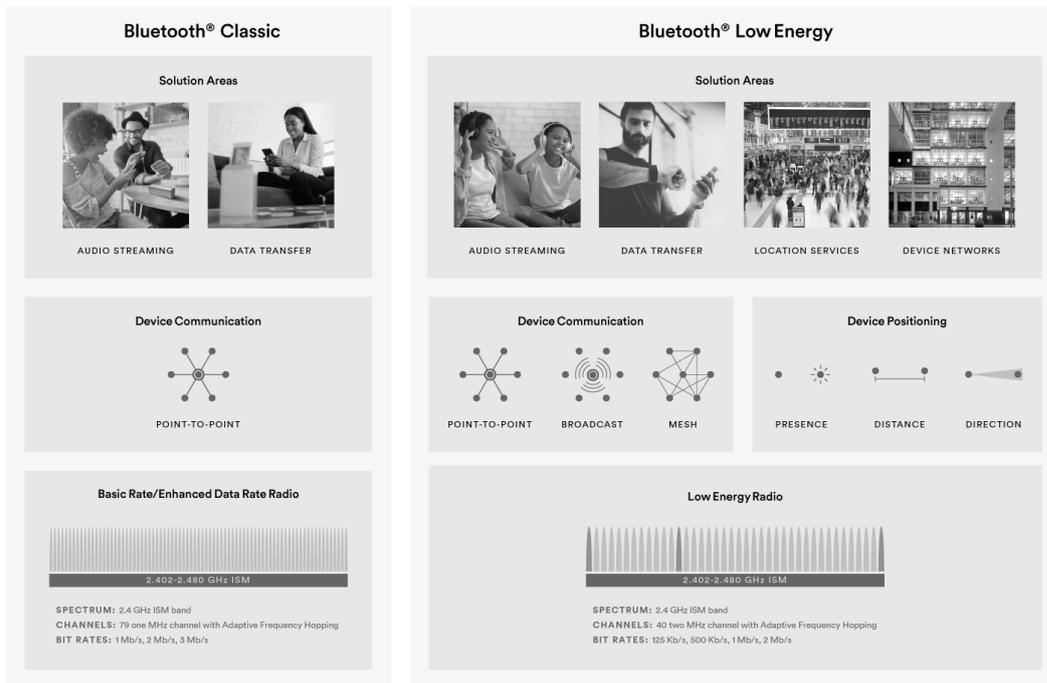


Figura 3.5 Differenze tra Bluetooth Classic e Bluetooth Low Energy. (Bluetooth Technology Overview | Bluetooth® Technology Website, s.d.)

Tabella7. Differenze tra Bluetooth Classic e Bluetooth Low Energy.(*Bluetooth Technology Overview / Bluetooth® Technology Website, s.d.*)

	Bluetooth Low Energy	Bluetooth Classic
Frequency Band	2.4GHz ISM Band (2.402 – 2.480 GHz Utilized)	2.4GHz ISM Band (2.402 – 2.480 GHz Utilized)
Channels	40 channels with 2 MHz spacing (3 advertising channels/37 data channels)	79 channels with 1 MHz spacing
Channel Usage	Frequency-Hopping Spread Spectrum (FHSS)	Frequency-Hopping Spread Spectrum (FHSS)
Modulation	GFSK	GFSK, $\pi/4$ DQPSK, 8DPSK
Data Rate	LE 2M PHY: 2 Mb/s LE 1M PHY: 1 Mb/s LE Coded PHY (S=2): 500 Kb/s LE Coded PHY (S=8): 125 Kb/s	EDR PHY (8DPSK): 3 Mb/s EDR PHY ($\pi/4$ DQPSK): 2 Mb/s BR PHY (GFSK): 1 Mb/s
Tx Power*	≤ 100 mW (+20 dBm)	≤ 100 mW (+20 dBm)
Rx Sensitivity	LE 2M PHY: ≤ -70 dBm LE 1M PHY: ≤ -70 dBm LE Coded PHY (S=2): ≤ -75 dBm LE Coded PHY (S=8): ≤ -82 dBm	≤ -70 dBm
Data Transports	Asynchronous Connection-oriented Isochronous Connection-oriented Asynchronous Connectionless Synchronous Connectionless Isochronous Connectionless	Asynchronous Connection-oriented Synchronous Connection-oriented
Communication Topologies	Point-to-Point (including piconet) Broadcast Mesh	Point-to-Point (including piconet)
Positioning Features	Presence: Advertising Direction: Direction Finding (AoA/AoD) Distance: RSSI, HADM (Coming)	None

2.2 Architettura BLE

Una comprensione profonda e approfondita di Bluetooth LE richiede un'intima familiarità con le specifiche applicabili. L'architettura, le procedure e i protocolli di Bluetooth LE sono definiti in modo completo da una specifica chiave chiamata Bluetooth Core Specification. Il modo in cui i prodotti utilizzano Bluetooth in modo da essere interoperabili è coperto da raccolte di specifiche di due tipi speciali note come profili e servizi. I profili definiscono le regole per l'utilizzo della tecnologia Bluetooth per un particolare tipo di prodotto o applicazione; mentre i servizi contengono dati di stato relativi ad aspetti del dispositivo e supportano operazioni specifiche sui dati.

Bluetooth Core è la specifica principale per Bluetooth LE e Bluetooth Classic. Definisce l'architettura della tecnologia e i suoi livelli, descrive e definisce le sue caratteristiche principali e definisce le procedure formali alla base delle operazioni importanti e i protocolli con cui i dispositivi possono comunicare a un determinato livello dello stack. La specifica Bluetooth Core definisce il funzionamento della tecnologia Bluetooth e i requisiti per gli sviluppatori quando implementano uno stack Bluetooth o una o più delle sue caratteristiche.

Lo stack³⁴ Bluetooth LE è composto da una serie di livelli e moduli funzionali, alcuni dei quali sono obbligatori e altri opzionali. Queste parti dello stack sono distribuite in due blocchi architettonici principali, noti come host e controller, e un'interfaccia logica standard definisce il modo in cui questi due componenti possono comunicare.

L'host è spesso qualcosa di simile a un sistema operativo, il controller invece è spesso un sistema su chip. Tuttavia, questo non è necessariamente così e le specifiche Bluetooth non impongono alcun dettaglio di implementazione. L'importante è che l'host e il controller agiscano come contenitori logici separati nell'architettura, e che possano essere implementati in componenti fisicamente separati in qualche modo, con un'interfaccia standard definita per la comunicazione tra loro. Ciò consente a un sistema Bluetooth di essere composto da componenti host e controller di produttori diversi.

³⁴ La parola "stack" deriva dall'inglese e significa letteralmente "pila", anche identificata come "struttura"; in informatica sta a significare quell'insieme di software e applicazioni che, legati l'uno all'altro, portano alla creazione di progetti informatici e tecnologici. In altre parole, se un protocollo è un modo universalmente accettato di comunicare tra due dispositivi, uno stack di protocolli non è altro che un insieme di protocolli che lavorano insieme per trasmettere informazioni da un dispositivo Bluetooth LE a un altro.

La Figura 3.6 illustra lo stack Bluetooth LE, i suoi livelli e la loro distribuzione tra i componenti host e controller. L'Host Controller Interface (HCI) indica l'interfaccia logica tra i due, ma non è un componente fisico in quanto tale. L'HCI può essere implementata in diversi modi in termini di trasporto fisico sottostante, ma l'interfaccia logica o funzionale è sempre la stessa. LC3 è il Low Complexity Communication Codec, il codec audio predefinito utilizzato con Bluetooth LE Audio. Non fa parte dello stack Bluetooth LE standard in quanto tale, ma sarà sempre presente nei prodotti LE Audio con il componente LC3 implementato nell'host o nel controller, come illustrato.

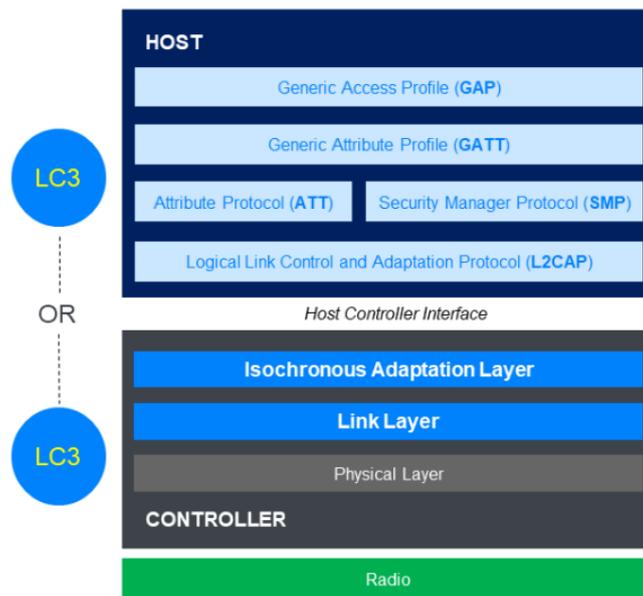


Figura 3.6 Stack BLE. (*The Bluetooth® Low Energy Primer | Bluetooth® Technology Website, s.d.*)

L'architettura BLE fa riferimento al modello OSI standard per i sistemi di comunicazione e si estende su tutti i livelli del modello a differenza di altri sistemi wireless che si limitano a una parte di essi. Un vantaggio che la tecnologia Bluetooth ha grazie al fatto di essere un sistema di comunicazione full stack è che non ci sono dipendenze esterne da altri organismi di standardizzazione. Tali dipendenze possono limitare l'evoluzione di una tecnologia.

Facendo riferimento alla figura 3.6 si analizzano ora brevemente i livelli presenti nel controller e nell'host.

2.2.1 Livello Fisico (PHY)

Il livello fisico di Bluetooth LE definisce il modo in cui il trasmettitore/ricevitore radio viene utilizzato per codificare e decodificare i dati digitali per la trasmissione e la ricezione, nonché altri parametri e proprietà radio che si applicano. Nella pratica, definisce aspetti della tecnologia quali le bande di frequenza in cui trasmettere gli advertisement, l'uso dei canali, le caratteristiche dei trasmettitori e ricevitori.

Contiene quindi i circuiti di comunicazione analogici e si occupa dell'effettivo trasferimento di dati via etere tramite radiofrequenze a 2,4 GHz utilizzando la tecnica di modulazione GFSK.

Il Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK) è uno schema di modulazione utilizzato per codificare i dati digitali dai livelli superiori dello stack prima della trasmissione e per decodificare i segnali radio ricevuti. Il GFSK funziona prendendo un segnale con la frequenza centrale del canale selezionato (la portante) e spostandolo verso l'alto di una quantità specifica per rappresentare un valore digitale di 1 o verso il basso della stessa quantità per rappresentare un valore binario di 0. Al segnale viene applicato un filtro gaussiano per ridurre il rumore che può accompagnare i cambiamenti di frequenza.

2.2.2 Link Layer

Il livello successivo è il livello di collegamento (o Link Layer) che, a differenza del livello fisico, è solitamente implementato come una combinazione di hardware e software ed è responsabile della scansione degli advertisement e della creazione e del mantenimento delle connessioni.

Gran parte della versatilità di BLE si basa sulla sofisticazione del Link Layer. Quest'ultimo ha molte responsabilità, si occupa infatti di definire i diversi formati di pacchetti trasmessi via etere, le procedure di elaborazione del flusso di bit, come il controllo di errori, e un protocollo di interfaccia aerea associato.

I pacchetti definiti dal livello di collegamento contengono i campi *Preamble*, *Access Address*, e *Cyclic Redundancy Check (CRC)*. Il *Preamble* consente al ricevitore di sincronizzarsi con precisione sulla frequenza del segnale; l'*Access Address* viene utilizzato dai ricevitori per differenziare i segnali dal rumore di fondo e per determinare l'importanza o meno di un pacchetto per il dispositivo ricevente; il *CRC* è utilizzato per il rilevamento degli errori. La figura 3.7 mostra il formato dei pacchetti del livello di collegamento per i PHY LE non codificati.

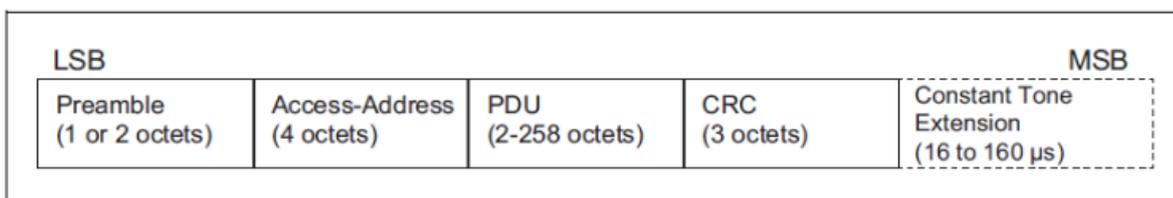


Figura 3.7 Formato dei pacchetti del livello di collegamento per i PHY LE non codificati. (*The Bluetooth® Low Energy Primer* | *Bluetooth® Technology Website*, s.d.)

Il campo PDU dei pacchetti del livello di collegamento può contenere diverse unità di dati di protocollo (PDU) a seconda dell'utilizzo di Bluetooth LE. I campi PDU e CRC sono sottoposti a un processo chiamato *whitening* prima della trasmissione del pacchetto. Lo scopo dell'imbiancatura è quello di evitare lunghe sequenze di zeri o di uno nei pacchetti, in quanto

ciò può causare la deriva del blocco di frequenza del ricevitore. Il processo di *whitening* viene invertito dal ricevitore per ripristinare il flusso di bit originale prima del controllo del CRC.

Come già visto, Bluetooth LE divide la banda di frequenza di 2,4 GHz in quaranta canali. Di questi quaranta canali, il 37, 38 e 39 vengono utilizzati per scambiarsi gli advertisement, mentre i restanti trentasette come canali di dati. Con advertisement si intende quando un dispositivo BLE, chiamato periferico, comunica la sua presenza tramite i tre canali sopraccitati ad un altro dispositivo, chiamato centrale, che, se si dimostra interessato, permetterà lo scambio di dati in quei trentasette canali tramite il meccanismo di *frequency hopping*. Tale meccanismo aiuta ad evitare interferenze con altri segnali, come quello Wi-fi, che si propaga nella stessa banda ISM. Infatti, il *frequency hopping* prevede che il canale radio utilizzato per la comunicazione dei pacchetti cambi a intervalli regolari. I canali vengono scelti utilizzando un algoritmo di selezione dei canali e una tabella di dati chiamata mappa dei canali che classifica ogni canale come utilizzato o non utilizzato. Le implementazioni possono monitorare la qualità della comunicazione su ciascun canale e, se si scopre che un canale non funziona bene, magari a causa di interferenze da altre fonti, la mappa dei canali può essere aggiornata per impostare la classificazione di quel canale come non utilizzato e quindi non più selezionato dall'algoritmo. In questo modo, l'algoritmo di selezione dei canali si adatta alle condizioni che si verificano e ottimizza le prestazioni più affidabili.

2.2.3 Isochronous Adaptation Layer (ISOAL)

Lo scopo del Isochronous Adaptation Layer (ISOAL) è in gran parte quello di risolvere un potenziale problema che può interessare sia la comunicazione isocrona³⁵ connessa che quella trasmessa che coinvolge i dispositivi audio.

Insieme il livello fisico, il livello di collegamento e l'ISOAL formano il controller. Facendo sempre riferimento alla figura 3.6, si passi ora ai successivi livelli appartenenti all'host. L'host si occupa semplicemente di immettere ed estrarre i dati, mentre il controller controlla la radio e mappa le richieste di connessione dai livelli superiori sugli slot temporali fisici della radiofrequenza. Quindi, per dirla in modo semplice, se l'host è interessato a scambiare i dati, sarà il controller ad occuparsi di spostare questi dati.

2.2.4 Host Controller Interface (HCI)

Attraverso l'Host Controller Interface (HCI) l'host può impartire comandi al controller e

³⁵ La modalità di comunicazione isocrona è una modalità ibrida che si ottiene quando si fa comunicare un dispositivo sincrono con un asincrono. In una comunicazione sincrona il trasmettitore invia i dati un bit per volta con una determinata frequenza costante, ovvero oltre al canale su cui viaggiano i dati ne esiste un altro tra i due dispositivi sul quale viaggia un segnale di clock. Grazie a quest'ultimo il ricevitore, all'interno del treno di impulsi che riceve dal trasmettitore, sa quando finisce un bit e quando ne inizia un altro. Nel caso asincrono invece non esiste nessun tipo di sincronia tra ricevitore e trasmettitore, quest'ultimo quando è pronto inizia a trasmettere serialmente i bit che vengono letti direttamente dal ricevitore.

il controller può comunicare con l'host. La specifica è suddivisa in diverse parti, la prima definisce l'interfaccia solo in termini funzionali, senza considerare meccanismi di implementazione specifici, mentre le altre parti definiscono come l'HCI può essere implementato quando si utilizzano i trasporti fisici. L'interfaccia funzionale è definita in termini di comandi ed eventi. Si tratta essenzialmente di messaggi che possono essere scambiati tra host e controller. I comandi vengono inviati dall'host al controller e gli eventi dal controller all'host. Un evento può essere una risposta a un comando, oppure può essere inviato da un messaggio non richiesto.

2.2.5 Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)

Il primo livello nell'host è l'L2CAP, acronimo per Logical Link Control and Adaptation Protocol. L'L2CAP fornisce servizi di incapsulamento dei dati ai livelli superiori, è responsabile dell'integrità dei dati; quindi, nel caso in cui un pacchetto non raggiunga la destinazione, questo livello assicura la ritrasmissione. Nello specifico è responsabile del multiplexing³⁶ del protocollo, del controllo di flusso, della segmentazione e del riassettaggio delle unità di dati di servizio (SDU). L2CAP utilizza il concetto di canale per separare le frequenze di pacchetti che passano tra i livelli dello stack.

2.2.6 Security Manager Protocol (SMP)

Il prossimo livello è il protocollo Security Manager (SMP) fa parte del componente Security Manager dello stack. Fornisce servizi agli altri livelli consentendo una connessione e uno scambio dati sicuri tra due dispositivi BLE. Quindi, supporta l'esecuzione di procedure relative alla sicurezza come l'accoppiamento, il legame e la distribuzione delle chiavi. Il componente security manager fornisce una serie di strumenti crittografici per le funzioni di sicurezza che gli altri livelli possono utilizzare e definisce algoritmi di accoppiamento.

2.2.7 Generic Access Profile (GAP)

La sezione Generic Access Profile (GAP) della Specifica Bluetooth Core definisce le procedure di rilevamento dei dispositivi e di instaurazione delle connessioni tra due dispositivi. GAP fornisce l'accesso alle operazioni del livello di collegamento, ciò include la definizione del ruolo del dispositivo BLE che gestisce la connessione degli advertisement e la sicurezza; in pratica il GAP predispone tutto ciò che ha a che fare con il modo in cui i dispositivi BLE formano connessioni tra loro.

Con il termine *Profile* all'interno di GAP, ci si riferisce al fatto che questo livello stabilisce il profilo, cioè la modalità d'uso del protocollo per raggiungere l'obiettivo della formazione di una connessione tra due dispositivi BLE. La trasmissione degli advertisement e la loro ricezione

³⁶ Nel settore delle telecomunicazioni e delle reti di computer, il multiplexing (o moltiplicazione) è una tecnica di "composizione" e "decomposizione" dei segnali che permette di inviare più flussi di dati digitali o più messaggi analogici in un unico segnale (detto multiplato) utilizzando un solo canale comunicativo.

attraverso la scansione sono al centro del funzionamento di GAP. A questo scopo GAP definisce ruoli rigorosi per i dispositivi e questi ruoli forniscono requisiti specifici per il controller sottostante. Dal momento che i dispositivi possono trasmettere dati o riceverli o fare entrambe le cose, ci sono quattro ruoli possibili:

- Il primo è il *broadcaster* che continua a trasmettere i suoi dati e a inviare advertisement: un esempio potrebbe essere un termometro che annuncia periodicamente la sua identità e continua a trasmettere dati relativi alla temperatura ambiente;
- A seguito, l'*osservatore* è un dispositivo Bluetooth a basso consumo energetico che esegue una scansione costante degli advertisement dei dispositivi nelle vicinanze e può quindi leggere gli advertisement e analizzare i pacchetti di risposta di questi dispositivi, ma non può stabilire ulteriori connessioni, il che significa che può semplicemente osservare i dati;
- Il prossimo elemento è la *centrale*, che riceve gli advertisement ma, a differenza dell'osservatore, può interagire con qualsiasi stazione, può avviare il processo di connessione ed è quindi nota come *master* e può connettersi con più periferiche;
- l'ultimo ruolo, che è quello di *periferica (o slave)*, è quello che emette advertisement e che, una volta connesso con la centrale, continua a scambiare dati solo con quella particolare centrale, può ancora emettere advertisement ma non può connettersi ad altre stazioni finché la sessione con quella particolare centrale non è conclusa.

La comunicazione master-slave avviene in questo modo: la periferica continua a inviare gli advertisement, ad esempio ogni 20 millisecondi, se la centrale vuole ottenere i dati dalla periferica invia qualcosa chiamato messaggio di indicazione di connessione sul canale dell'advertisement; in esso fornisce la sua sequenza di hop frequency e il canale su cui la periferica deve sintonizzarsi, a questo punto quindi si forma una connessione in cui la periferica sintonizza il suo ricevitore sul canale specificato e inizia ad ascoltare

2.2.8 Generic Attribute Profile (GATT)

Il Generic Attribute Profile (GATT) si occupa dello scambio di dati nei BLE; quindi, è il livello dati più alto di BLE. Ora, senza una connessione non è ovviamente possibile avere un trasferimento di dati bidirezionale tra due dispositivi BLE, il che significa che i dispositivi hanno già attraversato il processo di connessione che è governato da GAP.

GATT definisce tipi di dati di livello superiore basati sugli attributi contenuti nella tabella degli attributi, ovvero utilizza il protocollo ATT per il trasferimento dei dati. Questi tipi di dati sono chiamati servizi, caratteristiche e descrittori. Il GATT definisce inoltre una serie di procedure per l'utilizzo di questi tipi di dati attraverso il protocollo degli attributi (ATT), di cui si tratterà nel sottoparagrafo successivo.

I dati sono disponibili in una struttura organizzata che garantisce la facilità di accesso: i

profili, che di per sé non esistono in un dispositivo BLE, contengono i servizi, che ci permettono di raggiungere un determinato obiettivo, questi a loro volta si diversificano tra loro attraverso un insieme di dati chiamati caratteristiche.

I servizi si identificano attraverso un UUID, che è fondamentalmente un'etichetta unica che consente di accedere a un particolare servizio. L'UUID può essere di 16 bit per un servizio BLE adottato ufficialmente o di 128 bit per servizi personalizzati. Per servizi personalizzati si intende quando uno sviluppatore, non soddisfatto dalle caratteristiche di un servizio predefinito dalla specifica Bluetooth, decide di creare i propri servizi a sua necessità.

Questo ci porta a concetto di livello più basso del GATT che è quello delle caratteristiche. Come già detto, esse corrispondono al concetto di livello più basso nelle transazioni GATT: le caratteristiche incapsulano un singolo punto o valore di dati, ma possono anche contenere un array di dati correlati come i valori x y z di un accelerometro a tre assi simili; ai servizi, le caratteristiche hanno un UUID predefinito a 16 bit o personalizzato a 128 bit.

Due dispositivi che scambiano dati vengono chiamati client e server. La periferica è nota come *server* e contiene i dati quindi le definizioni dei servizi e delle caratteristiche; mentre, il *client* invia richieste al *server* per accedere ai suoi dati. Si noti che un dispositivo BLE può agire come server e client allo stesso tempo. Ci sono sei tipi di operazioni associate alle caratteristiche:

- La prima delle quali è costituita dai comandi che vengono inviati dal client al server e non richiedono una risposta, come ad esempio il comando di scrittura;
- Le richieste, che vengono inviate dal client al server e richiedono una risposta;
- Pertanto, il server fornirà una risposta;
- Le successive sono le notifiche, che vengono inviate dal server al client per informarlo di un cambiamento in un particolare valore caratteristico, ad esempio la temperatura;
- Se i dati di tale notifica cambiano nel server, quest'ultimo notificherà al client il cambiamento del valore ma in questo caso il client invia una conferma al server che conferma che l'indicazione è stata ricevuta con successo;
- Il che porta all'ultima operazione che è la conferma, come appena discusso, che viene inviata dal client al server e non è altro che un pacchetto di conferma inviato al server per fargli sapere che il client ha ricevuto un'indicazione con successo.

2.2.9 Attribute Protocol (ATT)

L'Attribute Protocol (ATT) è utilizzato da due dispositivi, uno che agisce nel ruolo di client e l'altro nel ruolo di server. Il server espone una serie di dati composti noti come attributi. Gli attributi sono organizzati dal server in un elenco indicizzato chiamato tabella degli attributi. Ogni attributo contiene un handle, un UUID (Universally Unique Identifier), un valore e un insieme di permessi:

- L'handle è un valore di indice univoco con cui un client ATT può fare riferimento a una

- voce specifica della tabella degli attributi;
- L'UUID identifica il tipo di attributo;
 - Il campo dei permessi è un insieme di flag che indicano se è consentito l'accesso in lettura, in scrittura o in entrambe le forme di accesso e qualsiasi altra condizione di sicurezza che deve essere soddisfatta per consentire l'accesso;
 - La guida di studio Bluetooth SIG Understanding Security in Bluetooth LE contiene ulteriori informazioni sui permessi degli attributi;
 - Il campo del valore dell'attributo è un array di byte che contiene il valore dell'attributo. L'interpretazione dell'array di byte, sia in termini di tipi di dati che di semantica, è di competenza dei livelli superiori dello stack.

Riassumendo rapidamente tutto: il primo profilo, il GAP, non si preoccupa di quale protocollo si utilizzi, o di quale trasporto, ma si limita a definire un insieme di regole per lo stack BLE per assicurarsi che tutto funzioni senza problemi; spetta a GATT, che è il sotto profilo di GAP, selezionare un trasporto e un protocollo per memorizzare e spostare i dati. GATT utilizza il protocollo ATT, che si affida alla natura priva di errori del protocollo L2CAP per svolgere il proprio lavoro. L2CAP è il gateway per i protocolli di livello inferiore e infine per la radio fisica.

Infine, riassumiamo i passaggi necessari per stabilire la connessione e lo scambio di dati tra una centrale e una periferica. Innanzitutto, la centrale esegue una scansione per individuare le periferiche che stanno lanciando advertisement, per poi formare una connessione con una particolare periferica; quindi, scopre i servizi su quella particolare periferica e le caratteristiche dei servizi di interesse, infine legge o scrive i valori sulle caratteristiche di interesse per poi disconnettersi dopo aver completato il trasferimento dei dati.

2.3 Protocolli BLE: iBeacon ed Eddystone

Con il termine Beacon (faro) si indica un dispositivo che invia periodicamente un segnale radio, utilizzato da apparati riceventi per permettere agli stessi di determinare la propria posizione rispetto ai dispositivi emettenti. I Beacon BLE sono privi di connessione e trasmettono segnali radio servendosi dei canali 37, 38 e 39.

La parte interessante della tecnologia Beacon BLE è che non è necessario l'accoppiamento del dispositivo per ricevere segnali - chiamati *advertising* - dal beacon. I pacchetti *advertising* contengono generalmente un piccolo carico di dati, generalmente noto come Protocol Data Unit (PDU), l'indirizzo MAC, l'identificatore univoco del dispositivo e un piccolo spazio per i dati specifici del produttore.

Sia Apple che Google hanno manipolato questa piccola porzione di informazioni incapsulate nell'*advertising* PDU e hanno introdotto i propri profili beacon, rispettivamente iBeacon e Eddystone. Il protocollo Eddystone e il protocollo iBeacon sono entrambi protocolli di trasmissione wireless a corto raggio utilizzati per fornire informazioni basate sulla posizione agli utenti attraverso dispositivi mobili. Entrambi i protocolli sono stati sviluppati per abilitare

la tecnologia di localizzazione indoor e sono spesso utilizzati in applicazioni di marketing, pubblicità e servizi basati sulla posizione.

iBeacon è un protocollo di trasmissione wireless introdotto da Apple nel 2013. Funziona anche attraverso la tecnologia Bluetooth Low Energy (BLE) e permette ai dispositivi di inviare segnali agli altri dispositivi nelle vicinanze. Tuttavia, a differenza di Eddystone, iBeacon è un protocollo più specifico che si concentra principalmente sulla trasmissione di un identificatore univoco chiamato UUID (Universally Unique Identifier) insieme a due valori numerici chiamati Major e Minor.

Gli iBeacon sono utilizzati principalmente per fornire informazioni sulla posizione e per creare esperienze personalizzate basate sulla posizione all'interno delle app. Quando un dispositivo rileva un iBeacon nelle vicinanze, l'app può essere programmata per avviare determinate azioni, come inviare notifiche push, fornire informazioni specifiche o attivare altre funzionalità basate sulla posizione.

Apple ha creato una propria struttura di pacchetto di advertising, con una formattazione ben precisa, per il posizionamento indoor dei propri dispositivi basati su iOS. Gli iBeacon possono funzionare per mesi o addirittura anni con una batteria a bottone. Il basso consumo energetico è reso possibile dalle ridotte dimensioni dei dati dell'advertising PDU, che ha una lunghezza totale di 46 byte. Questa struttura a pacchetti non solo consente una comoda identificazione dei singoli dispositivi beacon, ma fornisce anche all'industria uno standard universale per lo sviluppo di applicazioni.

Google ha lanciato il suo profilo BLE open source, Eddystone, per competere con lo standard Beacon di Apple. Eddystone è un protocollo di trasmissione wireless sviluppato da Google nel 2015. Si basa sulla tecnologia Bluetooth Low Energy (BLE) e consente ai dispositivi di inviare dati, chiamati pacchetti, ad altri dispositivi nelle vicinanze. I pacchetti Eddystone contengono informazioni sulla posizione o altre informazioni rilevanti che possono essere rilevate dagli utenti attraverso le loro app o dispositivi abilitati per BLE.

Il protocollo Eddystone è progettato per essere flessibile e può trasmettere diversi tipi di pacchetti, tra cui:

- Eddystone-UID: Trasmette un identificatore univoco che può essere utilizzato per identificare un dispositivo o una posizione specifica;
- Eddystone-URL: Trasmette un URL che può essere aperto direttamente sul dispositivo dell'utente, consentendo di fornire informazioni dettagliate o reindirizzamenti a siti web;
- Eddystone-TLM: Trasmette dati telemetrici come il livello di batteria del dispositivo, la temperatura ambientale, il conteggio dei pacchetti trasmessi, ecc.

In sintesi, sia Eddystone che iBeacon sono protocolli di trasmissione wireless che sfruttano la tecnologia Bluetooth Low Energy per fornire informazioni sulla posizione agli utenti attraverso i loro dispositivi mobili. Eddystone offre una maggiore flessibilità in termini di tipi di

pacchetti trasmessi, mentre iBeacon si concentra principalmente sull'invio di identificatori univoci per attivare azioni specifiche all'interno delle app.

2.4 Dispositivi BLE

Per quanto riguarda i dispositivi che utilizzano la tecnologia BLE, sono presenti varie alternative sul mercato internazionale, tra cui le più famose e adottate sono gli Estimote e i BlueCats. Gli Estimote e i BlueCats sono entrambi dispositivi di localizzazione e tracciamento utilizzati nella tecnologia dei beacon. Consentono di fornire informazioni e interazioni basate sulla posizione all'interno di un determinato ambiente.

Gli Estimote sono beacon Bluetooth a basso consumo energetico che emettono segnali radio che possono essere rilevati dai dispositivi mobili nelle vicinanze. Funzionano con la tecnologia Bluetooth Low Energy (BLE) e sono ampiamente utilizzati per fornire esperienze basate sulla posizione in vari contesti come negozi, musei e centri commerciali. Ecco come funzionano:

- Configurazione: Gli Estimote possono essere configurati utilizzando un'app dedicata. È possibile impostare parametri come l'identificatore univoco del beacon, la potenza di trasmissione e il periodo di broadcasting;
- Rilevazione: Un'applicazione mobile dotata di funzionalità di rilevamento dei beacon può scansionare l'ambiente circostante per rilevare i segnali emessi dagli Estimote. Quando un dispositivo mobile si avvicina a un beacon, riceve il segnale e può calcolare la distanza approssimativa tra il dispositivo e il beacon in base alla potenza del segnale ricevuto;
- Interazione: Una volta che l'app rileva un beacon Estimote, può avviare un'azione o fornire un'informazione specifica in base alla posizione del dispositivo rispetto al beacon. Ad esempio, in un negozio di abbigliamento, una app potrebbe inviare una notifica promozionale personalizzata quando un cliente si avvicina a un determinato reparto.

BlueCats è un altro produttore di beacon che opera utilizzando la tecnologia Bluetooth. Offrono beacon e hardware correlato per il tracciamento e la localizzazione. I dispositivi BlueCats funzionano nel seguente modo:

- Configurazione: I dispositivi BlueCats possono essere configurati utilizzando il software fornito dal produttore. Durante la configurazione, è possibile impostare parametri come l'identificatore del beacon, la potenza di trasmissione e gli intervalli di broadcasting;
- Rilevazione: Le app mobili compatibili con la tecnologia dei beacon possono rilevare i segnali emessi dai dispositivi BlueCats. Quando un dispositivo mobile si trova nell'area di copertura di un beacon BlueCats, riceve il segnale e può calcolare la distanza approssimativa dal beacon;

- Utilizzo dei dati: I dati di posizione rilevati dai dispositivi BlueCats possono essere utilizzati per fornire informazioni contestuali o attivare azioni specifiche all'interno di un app. Ad esempio, in un museo, una app può fornire informazioni dettagliate su un'opera d'arte quando il visitatore si trova nelle immediate vicinanze del beacon associato a quella specifica opera.

Entrambi i dispositivi utilizzano la tecnologia Bluetooth Low Energy (BLE) per comunicare con i dispositivi mobili, e questa tecnologia è supportata sia da Android che da iOS. Per utilizzare i dispositivi Estimote o BlueCats con un'applicazione su Android o iOS, è necessario avere un'applicazione mobile compatibile che possa rilevare i segnali emessi dai beacon e interagire con essi.

Le librerie e gli SDK (Software Development Kit) forniti dai produttori Estimote e BlueCats consentono agli sviluppatori di integrare facilmente la funzionalità dei beacon nelle loro applicazioni mobili su entrambe le piattaforme. È importante notare che alcune funzionalità specifiche o dettagli di implementazione potrebbero variare a seconda della piattaforma (Android o iOS) e del sistema operativo utilizzato su un determinato dispositivo.

2.5 Domini applicativi di BLE

Le prestazioni a basso consumo energetico di BLE e l'ampia diffusione nei dispositivi mobili lo rendono un candidato eccellente per la varietà di applicazioni, tra cui molti domini applicativi emergenti. In questo paragrafo si riassumono brevemente i domini applicativi di BLE, dividendoli in tradizionali ed emergenti.

Tra i domini applicativi tradizionali troviamo la *localizzazione indoor*, il *rilevamento di prossimità* e il *rilevamento di attività* (Jeon et al., 2018):

- La *localizzazione indoor* è una delle più importanti applicazioni prospettiche dei beacon BLE. Per la localizzazione sono state utilizzate altre tecnologie, come RFID, banda ultra-larga e infrarossi. Tuttavia, queste tecnologie richiedono un lettore dedicato per funzionare e quindi è difficile per il grande pubblico utilizzare pienamente questi servizi. Recentemente i sistemi IPS basati su BLE sono stati utilizzati, ad esempio, per aiutare gli ipovedenti a navigare in strutture interne e in ambienti diversi, come musei e aeroporti;
- Il *rilevamento di prossimità* è la distanza relativa da un oggetto, si differenzia dalla localizzazione, la quale invece si riferisce alla posizione assoluta all'interno di un determinato ambiente. Ciò significa che un beacon può essere collegato a oggetti non fissi e le informazioni di prossimità possono attivare un evento, consentendo un'interazione continua tra l'utente e l'oggetto. Ad esempio, il PhysicalWeb di Google sfrutta i beacon che utilizzano il protocollo Eddystone per trasmettere un URL ai dispositivi circostanti senza bisogno di scaricare applicazioni;
- Il *rilevamento di attività* consiste nel conoscere la micro-localizzazione dell'utente, la quale consente di restringere l'elenco dei possibili gesti/azioni che l'utente potrebbe

compiere. Viene sfruttata ad esempio per tenere traccia sull'attività degli anziani, ai quali viene fatto indossare un beacon dotato di accelerometro: i segnali dei beacon BLE scansionati da scanner fissi predisposti identificano la micro-localizzazione dell'utente, mentre l'accelerometro incorporato identifica semplici attività come stare seduti, in piedi e camminare.

Oltre alle applicazioni di cui sopra che possono essere supportate direttamente da BLE, ci sono numerose altre applicazioni che possono beneficiare di comunicazioni basate su BLE. La maggior parte delle applicazioni in questi domini sono attualmente supportate da altre tecnologie wireless, ma BLE può fornire funzionalità complementari o espandere la funzionalità dei sistemi che utilizzano tecnologie di rete ibrida. Di seguito si trattano le principali (Yang et al., 2020):

- Attraverso dispositivi che ospitano la tecnologia BLE è possibile interagire con gli smart buildings. Ad esempio, gli utenti con i trasmettitori BLE possono condividere la conoscenza spaziale con altri utenti nelle vicinanze. La conoscenza spaziale poi viene condivisa e diffusa attraverso numerosi incontri, consentendo al sistema di fornire richieste di conoscenza per gli utenti locali;
- Le VANET sono considerate una delle più importanti tecnologie per migliorare l'efficienza e la sicurezza dei moderni sistemi di trasporto. Nelle VANET, le comunicazioni veicolo-veicolo (V2V) e veicolo-infrastruttura (V2I) hanno suscitato un notevole interesse nella comunità dei ricercatori. Il BLE è stato proposto come tecnologia alternativa per le comunicazioni V2V: l'idea è quella di utilizzare comunicazioni BLE basate su connessioni, in cui a ciascun veicolo viene inizialmente assegnato un ruolo centrale (C) o periferico (P) e scambia dati con i vicini tramite connessioni C-P;
- Esistono già metodi di pagamento mobile che si basano su un contatto di breve durata, ad esempio il metodo NFC; tuttavia, tramite la tecnologia BLE si può offrire ai consumatori un'esperienza di pagamento più flessibile e con un processo di autenticazione più sicuro. Una prima soluzione prevede la sostituzione dell'NFC con il sistema BLE, la seconda di pagare tramite PayPal con una conferma verbale, ed una terza di scannerizzare e pagare da sé senza bisogno dei cassieri;
- Nella maggior parte dei casi di utilizzo del data-streaming, il BLE è inferiore ad altre tecnologie senza fili, come il Bluetooth classico, il Wi-Fi e le reti cellulari, soprattutto per quanto riguarda la capacità di raggiungere i dati. Tuttavia, mostra ancora un grande potenziale come metodo di backup, soprattutto per scenari con limitazioni di risorse, come la comunicazione di emergenza in caso di catastrofi naturali.

2.6 Localizzazione indoor tramite Beacon BLE

Sebbene inizialmente sia noto per le sue capacità di comunicazione con i dispositivi, Bluetooth LE è ora ampiamente utilizzato come tecnologia di posizionamento dei dispositivi per

rispondere alla crescente domanda di servizi di localizzazione indoor ad alta precisione. Bluetooth LE include ora funzioni che consentono a un dispositivo di determinare la presenza, la distanza e la direzione di un altro dispositivo.

La maggior parte della letteratura fa riferimento a sistemi che utilizzano le tecnologie BLE o WiFi, in quanto sono quelle che offrono le migliori prestazioni in termini di qualità e costo. BLE condivide molte somiglianze con il WiFi nella banda dei 2,4 GHz, e quindi è stato utilizzato per il posizionamento applicando le tecniche RSS, AoA e ToF, di cui RSS è la tecnica più spesso applicata. Le precisioni ottenibili con BLE sono in genere superiori a quelle del WiFi, il che è legato alla densità solitamente più elevata di emettitori distribuiti. Anche se i beacon BLE sono generalmente economici, la scalabilità a scenari di grandi dimensioni può essere un problema se sono necessarie distribuzioni dense.

Il posizionamento indoor basato sulla tecnica RSS si fonda su tre segmenti: percezione del segnale RF, server ed interfaccia utente: i beacon trasmettono segnali RF allo scanner (ricevitore) tramite Bluetooth nel segmento di percezione, contemporaneamente lo scanner passa l'indice RSS dei segnali ricevuti al segmento server, il quale contiene lo storage (NAS, Network Attached Storage), infine, il programma applicativo legge prima i dati RSSI dal database e, dopo aver eseguito il calcolo, memorizza le coordinate di posizionamento del risultato del calcolo nel database.

La tecnica RSS è la più spesso utilizzata dai sistemi Beacon BLE, ma esistono poi tre diversi algoritmi di localizzazione per i beacon: posizionamento basato sul raggio d'azione, sul fingerprinting e sulla prossimità; tra questi i primi due sono i più sfruttati per la localizzazione indoor. Il posizionamento basato sul raggio d'azione, più comunemente conosciuto come laterazione o lateralizzazione, utilizza una distanza stimata dal modello di perdita di intensità su scala logaritmica per stimare la posizione dell'oggetto; il fingerprinting prende la decisione sulla posizione in base ai segnali online e al database offline utilizzando un algoritmo di corrispondenza.

Secondo gli studi svolti da Duong & Thi, il fingerprinting sembra essere l'approccio più popolare, ma, per ottenere un'elevata accuratezza, richiede anche la raccolta di dati per molti punti di riferimento. Ciò richiede molto tempo e nella pratica risulta meno fattibile, inoltre l'approccio basato sulla laterazione viene implementato senza ulteriori requisiti, come la ricostruzione del database da parte di un rilevatore di mappe. Tuttavia, gli autori riconoscono anche i limiti della laterazione: si sa che la distanza varia in base alla funzione logaritmica, ma non è sempre facile determinarla a causa degli effetti del fading, della piccola scala e dell'assorbimento umano. Gli effetti di fast fading³⁷ o multipath hanno un impatto particolare sulla propagazione dei segnali BLE, poiché gli ambienti interni contribuiscono alle fluttuazioni dell'RSS. Inoltre, l'attenuazione del segnale dovuto a multipath non è costante e può variare a

³⁷ Nelle comunicazioni wireless, il fading è la variazione dell'attenuazione di un segnale con diverse variabili. Queste variabili includono il tempo, la posizione geografica e la frequenza radio.

qualsiasi distanza senza alcuno schema. Per questo motivo, per essere più precisi, ci si affida alla trilaterazione, in cui vengono incrociate tre diverse misurazioni del segnale ricevuto da un determinato beacon. Il metodo della trilaterazione non prevede una fase offline, ma richiede un database della posizione coordinata del beacon.

La letteratura suggerisce come metodi più noti l’RSS e il fingerprinting, anche se Bluetooth LE supporta già due metodi per calcolare la direzione da cui viene trasmesso il segnale ricevuto: il primo si chiama Angolo di arrivo (AoA) e il secondo Angolo di partenza (AoD). Entrambi i metodi prevedono un dispositivo con una serie di antenne e un processo di commutazione da un'antenna all'altra durante la trasmissione dei segnali di ricerca della direzione (metodo AoD) o durante la ricezione dei segnali (metodo AoA).

Nel paragrafo successivo vengono riportati alcuni studi che hanno proposto metodi di localizzazione differenti.

2.6.1 Studi correlati

L’analisi di letteratura si divide principalmente in due categorie: studi che analizzano la qualità dell’indoor positioning dal punto di vista matematico, e studi che si concentrano sulle applicazioni tecniche. In seguito, si riportano in breve alcuni di questi articoli.

Dinh et al. nel loro studio convengono sul fatto che il metodo del fingerprinting sembra essere il metodo più pratico, ma, per localizzare un semplice dispositivo cellulare, è necessaria la raccolta di dati per molti punti di riferimento; per questo motivo gli autori decidono di far riferimento a metodi basati sul raggio d’azione (laterazione), che però non risulta sempre preciso a causa degli effetti del fast fading. Per far fronte a tale problema propongo un metodo migliorato, in cui utilizzano solo beacon ritenuti affidabili, per i quali la stima della distanza tra il telefono e il beacon sia relativamente accurata. Per tali beacon affidabili si ottengono delle circonferenze che, come centro, hanno il beacon stesso e, per raggio, il segnale RSS; l’intersezione di un cluster di tre cerchi riporterà la posizione esatta. Per selezionare il cluster di tre beacon vengono utilizzate le informazioni di quattro beacon. Per questi quattro si applica il filtro di Kalman per isolare il valore RSS dal rumore, si studia il valore RSS e si determina se è LOS o non-LOS in base se è superiore o inferiore a -70 dBm, ed infine si sceglie attraverso un algoritmo la terna di beacon migliore.

Ramirez et al. utilizzano nella loro ricerca finalizzata al posizionamento indoor due tipi di componenti Bluetooth, Bluetooth Low Energy 4.2 e BLE 5.0, come beacon e scanner, al fine di valutare la stabilità del segnale e l’efficacia degli stessi negli esperimenti. Nell’esperimento effettuato un dispositivo mobile (scanner) cambia posizione al fine di raccogliere quanti più indici RSS possibili provenienti dai beacon posti in posizioni fisse. Per determinare poi la posizione verrà utilizzato il metodo della trilaterazione insieme al filtraggio di Kalman. Alla fine, è stata raggiunta un’accuratezza di posizionamento a livello di centimetri di circa 8-10 cm in un ambiente relativamente a bassa interferenza. Inoltre, BLE 5.0 ha presentato una maggiore

stabilità del segnale e prestazioni migliori in ambienti con minori interferenze, al contrario il posizionamento con dispositivi BLE 4.2 è stato influenzato dalla rifrazione delle onde radio.

Per migliorare l'accuratezza e la robustezza dei sistemi IPS, Zhuang et al. propongono un algoritmo per la localizzazione in ambienti interni con beacon BLE, utilizzando la combinazione di modello di regressione polinomiale (PRM), il fingerprinting, il rilevamento degli outlier e filtro di Kalman esteso (EKF). Un'altra novità introdotta dagli autori è la raccolta dei segnali RSS dai tre diversi canali (37,38 e 39), normalmente infatti, la maggior parte delle ricerche esistenti combina gli RSS di tutti i canali per ottenere un segnale aggregato. Tuttavia, in questo studio è stato evidenziato come la media e la deviazione standard dell'indice RSS nei tre canali cambia. Questa differenza potrebbe essere causata dal diverso guadagno del canale e dall'effetto multipath. Pertanto, un vantaggio di questa ricerca è che considera che i segnali e i rumori nelle misurazioni RSS dei vari canali possono essere diversi e quindi utilizza PRM e fingerprinting separati per i tre canali.

Allo stesso modo Paterna et al. invece di scegliere un solo canale per la comunicazione beacon, sfruttano i tre canali 37, 38 e 39 e inviano tre advertising a intervalli di 3 ms in modo che le caratteristiche del canale siano abbastanza simili, e quindi l'effetto del fast fading possa essere minimizzato combinandoli; successivamente calcolano il canale con la migliore precisione in termini di distanza RSS e lo utilizzano per i calcoli di posizionamento; come seconda soluzione utilizzano poi l'algoritmo di trilaterazione considerando però più affidabili le informazioni fornite dai ricevitori più vicini al mittente e spostando la posizione stimata nella posizione suggerita dal ricevitore; infine, si affidano al filtro Kalman per ridurre l'impatto delle misure errate sul sistema.

Faragher & Harle hanno studiato la tecnologia BLE per la georeferenziazione indoor tramite fingerprinting. In un banco di prova di circa 600 m² hanno distribuito diciannove beacon BLE, ciascuno di essi è stato impostato per emettere segnali a 50 Hz con una potenza di uscita di 0 dBm. Un dispositivo iPhone, in seguito, ha registrato gli advertisement e i segnali RSS tramite un'applicazione mobile. Allo stesso modo un dispositivo Nexus 4 Android 4.4.2 catturava i segnali Wi-fi. Per la creazione della mappa offline ogni impronta registrata è stata collegata ad una posizione reale ed è stata utilizzata la regressione del processo gaussiano per generare una mappa dell'intensità del segnale per ogni sorgente. L'articolo ha quindi dimostrato che è possibile ottenere un miglioramento significativo del posizionamento rispetto al WiFi anche utilizzando una distribuzione relativamente rada di beacon, tenendo conto delle caratteristiche dei segnali BLE.

Mutiara et al hanno creato un'applicazione mobile per facilitare la navigazione interna ed esterna a persone ipovedenti. L'applicazione sfrutta i segnali ricevuti da un dispositivo Estimote che supporta la tecnologia BLE, scelto possibile ottenere un miglioramento significativo del posizionamento rispetto al WiFi anche utilizzando una distribuzione relativamente rada di beacon, tenendo conto delle caratteristiche dei segnali BLE. Per la navigazione indoor, sono stati posizionati i beacon uno su ogni porta, e sono stati configurati in

modo che i segnali non si sovrapponevano; per la navigazione esterna invece i beacon sono stati configurati in modo da trasmettere il massimo del segnale Bluetooth. La configurazione dei beacon avviene attraverso l'app Estimote, che oltre a rilevare l'UUID e il Major e Minor, calcola la distanza del dispositivo dal beacon in base al segnale RSS. A questo punto l'applicazione funziona in questa maniera: se lo smartphone ottiene la posizione Bluetooth più vicina, l'applicazione controlla l'UUID dei beacon Estimote ricevuti. Una volta trovato l'UUID esatto, il database si apre e controlla la distanza. Se la distanza è compresa tra 21 e 100 metri, il sistema informerà tramite messaggio audio la persona ipovedente dell'edificio più vicino, mentre se la distanza è compresa tra 0 e 20 metri, il sistema informerà la persona ipovedente che si trova all'interno dell'edificio.

Anche Song et al. utilizzano i beacon Estimote per sviluppare il loro metodo di posizionamento indoor. A rilevare i segnali Bluetooth tramite un'applicazione sarà invece lo smartphone Samsung Galaxy Note 4. L'algoritmo per il rilevamento della posizione funziona nel seguente modo: in primo luogo, il sistema controlla lo stato del servizio Bluetooth negli smartphone; se il servizio Bluetooth è disattivato, richiede l'attivazione del servizio Bluetooth sull'applicazione implementata. A questo punto l'applicazione implementata è in attesa di ricevere i 100 valori RSSI da 4 beacon. Quando tutti i valori RSSI ricevuti vengono memorizzati nell'applicazione, il sistema proposto corregge questi valori RSSI utilizzando il filtro di Kalman per stimare con precisione la posizione dell'utente. Quando la deviazione standard calcolata dei valori RSSI corretti è inferiore a 4, per garantire la minimizzazione del rumore dei dati, il 20% dei valori superiori e inferiori viene rimosso dai valori RSSI corretti utilizzando una distribuzione normale. L'algoritmo proposto calcola quindi la media di ottanta valori RSSI per ogni beacon. Successivamente, il sistema calcola tre punti di interazione da tre beacon influenti per la stima della posizione dell'utente. Per scegliere i beacon influenti si parte dal presupposto che vi siano quattro beacon in una stanza di forma rettangolare, il beacon con il segnale RSS minore sarà quello più vicino al dispositivo, si sceglie dunque quello, si scarta quello opposto e si mantengono quelli adiacenti. Quando vengono determinati i tre punti corretti, il sistema proposto stima una posizione dell'utente che è il punto medio dei tre punti di intersezione con la triangolazione. In caso contrario, il sistema proposto torna al processo di ri-ricezione dell'RSSI.

Infine, Ferreira et al. hanno sviluppato un'applicazione mobile per l'indoor positioning, chiamata Find Me!, che si basa su una mappa estrapolata da modelli BIM. All'interno dell'edificio dell'Università di Lisbona, sono stati posizionati otto beacon BLE per piano in punti strategici, sono state infatti studiate varie opzioni e sono state scelte le posizioni in cui i beacon soffrivano meno interferenze. A seguito i beacon sono stati configurati e, attraverso l'algoritmo di path loss, è stata sviluppata l'app per la georeferenziazione indoor. Gli autori hanno visto come all'interno dell'area coperta dai segnali BLE l'app porta alla destinazione richiesta nel cento per cento dei casi.

2.7 App smartphone per l'indoor positioning

Per quanto riguarda le piattaforme di sviluppo dell'indoor positioning si può affermare che un ruolo importante sia ricoperto dalle applicazioni smartphone. L'avanzamento della tecnologia e la diffusione di dispositivi mobili ne hanno facilitato la diffusione. Con l'utilizzo di queste applicazioni gli utenti e le aziende hanno tratto diversi vantaggi: infatti, attraverso di queste è possibile non solo navigare ed orientarsi all'interno di edifici sconosciuti, ma anche i visitatori possono ricevere informazioni dettagliate sui punti di interesse circostante, orari di apertura, promozioni speciali, avvisi importanti, pubblicità mirata o molto altro.

Le applicazioni mobili per la localizzazione indoor basate sulla tecnologia BLE sfruttano i beacon Bluetooth Low Energy (BLE) per determinare la posizione dell'utente all'interno di un ambiente indoor. Generalmente funzionano seguendo cinque passaggi principali:

- Posizionamento beacon BLE: viene scelto il numero adatto di beacon e la posizione strategica all'interno dell'edificio o dell'ambiente, vengono poi configurati attraverso web app o mobile app, a seconda del dispositivo utilizzato;
- Scansione BLE: l'applicazione mobile sul dispositivo dell'utente esegue una scansione continua dell'ambiente circostante per rilevare i segnali emessi dai beacon nelle vicinanze;
- Rilevamento indice RSS;
- Calcolo della distanza: una volta ottenuto l'indice RSS, questo viene utilizzato per calcolare la distanza del dispositivo dal beacon, si possono applicare algoritmi differenti come il path loss, la trilaterazione o, alternativamente, la tecnica del fingerprinting;
- Restituzione della posizione: Una volta che la posizione approssimativa dell'utente è stata determinata, l'applicazione può utilizzare queste informazioni per fornire servizi basati sulla posizione, come indicazioni stradali, offerte personalizzate, informazioni sui prodotti e altro ancora.

Per interagire con i beacon BLE è necessario quindi avere un'applicazione mobile su Android o iOS. A questo scopo le librerie e gli SDK (Software Development Kit), forniti dai produttori dei beacon, consentono agli sviluppatori di integrare facilmente la funzionalità dei beacon nelle loro applicazioni mobili sulle piattaforme di Android o iOS. Un SDK è un insieme di strumenti, solitamente fornito dal produttore di una piattaforma hardware, di un sistema operativo o di un linguaggio di programmazione. Gli SDK consentono agli sviluppatori software di realizzare applicazioni specifiche per tale piattaforma, sistema o linguaggio di programmazione.

Nei paragrafi successivi si introducono le piattaforme più conosciute per creare applicazioni smartphone.

2.7.1 Microsoft Indoor Maps: Azure Maps

Azure Maps è un servizio di piattaforma cloud offerto da Microsoft Azure che fornisce

funzionalità avanzate di mapping e geolocalizzazione. È progettato per consentire agli sviluppatori di integrare mappe, dati geografici e funzionalità di posizionamento nelle loro applicazioni.

Azure Maps fornisce anche API (Application Programming Interface) che consentono agli sviluppatori di integrare queste funzionalità di mapping e geolocalizzazione nelle loro applicazioni web, mobili e desktop. Le API sono disponibili in diversi linguaggi di programmazione, facilitando l'integrazione di Azure Maps nei vari ambienti di sviluppo.

In sintesi, Azure Maps è una raccolta di servizi geospaziali ed SDK che usano dati di mappa aggiornati per fornire un contesto geografico alle applicazioni Web e per dispositivi mobili. Inoltre, i servizi di Mappe di Azure sono disponibili tramite Web SDK e Android SDK. Questi strumenti consentono agli sviluppatori di sviluppare e ridimensionare rapidamente soluzioni che integrano informazioni sulla posizione nelle soluzioni di Azure.

Azure Maps offre il supporto per la tecnologia Bluetooth Low Energy attraverso la sua funzionalità di rilevamento dei beacon. Utilizza i beacon BLE per migliorare la geolocalizzazione e offrire una migliore precisione nella determinazione della posizione all'interno di edifici o spazi interni. I beacon BLE possono essere collocati in punti strategici all'interno di un edificio e inviare segnali che possono essere rilevati dagli smartphone o da altri dispositivi mobili.

Quando un dispositivo mobile dotato di funzionalità di rilevamento beacon si avvicina a un beacon BLE, può rilevare il segnale del beacon e inviarlo ad Azure Maps. Azure Maps, quindi, utilizza queste informazioni per calcolare la posizione approssimativa del dispositivo all'interno dell'edificio o dello spazio coperto dai beacon. Questa posizione approssimativa può quindi essere utilizzata per offrire indicazioni stradali all'interno di un edificio, navigazione indoor o altre funzionalità basate sulla posizione. L'integrazione di BLE in Azure Maps consente di ampliare le capacità di geolocalizzazione anche in spazi interni, dove il segnale GPS potrebbe essere limitato o non disponibile.

Nel caso dell'Indoor Positioning è possibile creare mappe di interni utilizzando il Creator di Azure per interni. Per usare i servizi Creator, è necessario creare e associare una risorsa di Mappe di Azure Creator a un account di Azure Maps. Creator raccoglie i dati della mappa di interni convertendo un pacchetto di disegno caricato.

Il pacchetto di disegno rappresenta una struttura costruita o rimodellata. Il pacchetto di disegno include disegni salvati in formato DWG, ovvero il formato di file nativo per il software di AutoCAD® di Autodesk. In seguito, il servizio conversione converte un pacchetto di disegno caricato in dati mappa di interni. Oltre a ciò, il servizio di conversione convalida il pacchetto.

Gli SDK di Azure Maps sono principalmente focalizzati sulla mappatura, la geocodifica, il calcolo delle direzioni e altre funzionalità legate alle mappe.

Tuttavia, Azure fornisce un servizio chiamato "Azure IoT Hub" che può essere utilizzato per la gestione dei dispositivi IoT, compresi i beacon BLE. Utilizzando Azure IoT Hub insieme ad

altri servizi di Azure, si può creare una soluzione personalizzata per il rilevamento dei beacon BLE e l'integrazione con Azure Maps.

In questo scenario, una volta implementata la logica di rilevamento dei beacon BLE sui dispositivi mobili o in altre soluzioni hardware, i dispositivi potrebbero inviare i dati di rilevamento dei beacon ad Azure IoT Hub, che fungerebbe da punto di raccolta dei dati.

L'hub IoT di Azure è un servizio gestito, ospitato nel cloud, che funge da hub centrale di messaggi per le comunicazioni bidirezionali tra l'applicazione di IoT e i relativi dispositivi collegati. È possibile connettere milioni di dispositivi e le relative soluzioni back-end in modo affidabile e sicuro. Quasi tutti i dispositivi possono essere connessi a un hub IoT.

Esistono tre categorie di Software Development Kit (SDK) per l'uso con l'hub IoT:

- hub IoT SDK del dispositivo: consentono di creare app eseguite nei dispositivi IoT usando il client del dispositivo o il client del modulo. Queste app inviano dati di telemetria all'hub IoT e, facoltativamente, ricevono messaggi, processi, metodi o aggiornamenti gemelli dall'hub IoT. È possibile usare questi SDK per creare app per dispositivi che usano convenzioni e modelli di Azure Plug and Play IoT per annunciare le proprie funzionalità per Plug and Play IoT applicazioni abilitate. È anche possibile usare il client del modulo per creare moduli per il runtime di Azure IoT Edge;
- hub IoT SDK del servizio: consentono di creare applicazioni back-end per gestire l'hub IoT e, facoltativamente, inviare messaggi, pianificare processi, richiamare metodi diretti o inviare aggiornamenti delle proprietà desiderati ai dispositivi o ai moduli IoT;
- hub IoT SDK di gestione: consentono di creare applicazioni back-end che gestiscono gli hub IoT nella sottoscrizione di Azure.

Gli SDK di hub IoT di Azure forniscono diversi linguaggi di programmazione: C, C#, Node.js, Python e Java.

A questo punto Microsoft Azure fornisce le istruzioni per creare una applicazione Web, un'applicazione smartphone per Android o iOS.

2.7.2 *Estimote Indoor Location*

Estimote, oltre a produrre beacon che sfruttano la tecnologia BLE, ha sviluppato gli Estimote SDK che forniscono gli strumenti necessari per sviluppare app basate su questa tecnologia di indoor positioning.

Per procedere alla realizzazione di un'applicazione mobile per l'indoor positioning si parte dal processo di creazione di una mappa degli spazi. Questo serve all'SDK Indoor Location per conoscere la forma e le dimensioni dello spazio, nonché la posizione dei beacon. Estimote predispone una procedura guidata di mappatura e un API Location Builder riservate per il momento solo a iOS. Quindi la maniera più semplice per creare una mappa degli spazi è attraverso l'applicazione *Estimote Indoor Location* disponibile su iPhone 4S o versioni più nuove; altrimenti un secondo approccio prevede di mappare lo spazio in modo programmatico

con l'Indoor Location SDK. Nel secondo caso le istruzioni complete sono presenti nel sito developer.estimote.com.

A questo punto si può costruire una semplice applicazione iOS o Android che utilizza i Beacon ed Estimote Indoor Location per ottenere le coordinate precise dell'utente all'interno di uno spazio indoor.

I prerequisiti per lo sviluppo dell'applicazione sono: quattro o più Beacon Estimote, un account Estimote e per applicazioni iOS un computer Mac con Xcode e un iPhone 5 o versioni più nuove, mentre per applicazioni Android un computer con Android Studio e uno smartphone con Android 5.0 o più aggiornato.

Per la creazione di applicazioni in entrambe le piattaforme (Android o iOS) si è fatto riferimento alle istruzioni presenti nel sito developer.estimote.com, da cui sono stati estrapolati i passaggi principali.

Nel caso di un'applicazione iOS si inizia con un progetto Xcode e si collega tale progetto all'indoor SDK tramite l'app CocoaPods. L'indoor SDK è scritto in Objective-C³⁸ ed il suo fulcro nell'Indoor Location Manager che va aggiunto al progetto. A questo punto si collega l'app al servizio Estimote Cloud per poter scaricare la mappa della posizione che è stata creata in precedenza e, attraverso la proprietà `ViewController`, si memorizza l'oggetto di posizione che si andrà a recuperare nell'app. con l'oggetto di posizione memorizzato in modo sicuro si può ora avviare il posizionamento indoor.

Per un'applicazione Android i passaggi sono simili. Si crea un progetto in Android Studio e si imposta il livello minimo dell'API a 19, inserendo una riga di codice Gradle scaricherà l'Indoor SDK per Android. Ora, si colleghi l'app all'Estimote Cloud per poter scaricare la mappa di posizione che è stata creata in precedenza. Aggiungendo una nuova "Your Own App" verranno forniti l'ID e il Token dell'app, necessari per poter accedere all'API Cloud e per poter creare l'oggetto `IndoorLocationManager`. L'oggetto `Location` è necessario per avviare il posizionamento indoor. Anche per Android il fulcro dell'Indoor SDK è l'Indoor Location Manager, che permette di gestire la posizione indoor dell'app. Il modo più semplice per aggiornare la posizione scannerizzando i segnali provenienti dai beacon è utilizzare `ScanningIndoorLocationManager`, che effettua la scansione dei beacon automaticamente. In questo caso, è sufficiente configurare i listener per gli aggiornamenti di posizione. Infine, per concludere e finalizzare il processo si inseriscono i comandi per avviare e interrompere l'applicazione.

³⁸ Objective-C, spesso citato anche come Objective C o ObjC o Obj-C, è un linguaggio di programmazione riflessivo orientato agli oggetti, sviluppato da Brad Cox alla metà degli anni Ottanta presso la Stepstone Corporation. Come lo stesso nome suggerisce, l'Objective C è un'estensione a oggetti del linguaggio C.

2.7.3 *Kontakt.io*

Kontakt.io è un'azienda specializzata nella tecnologia di localizzazione e tracciamento basata su Bluetooth Low Energy. La loro principale offerta è una piattaforma di localizzazione indoor che utilizza i beacon BLE per fornire servizi di tracciamento e navigazione all'interno di edifici e ambienti chiusi.

La piattaforma di Kontakt.io offre una serie di funzionalità che sfruttano la tecnologia dei beacon BLE. Ad esempio, consente alle aziende di monitorare il movimento delle persone o delle risorse all'interno di un edificio, fornendo dati in tempo reale sulla loro posizione. Queste informazioni possono essere utilizzate per ottimizzare le operazioni, migliorare l'efficienza logistica, aumentare la sicurezza o offrire esperienze personalizzate ai visitatori.

Inoltre, Kontakt.io fornisce anche soluzioni software per lo sviluppo di applicazioni personalizzate che sfruttano la tecnologia dei beacon. Queste applicazioni possono essere utilizzate in vari settori, come il commercio al dettaglio, l'ospitalità, la logistica, la sanità e molto altro ancora.

Kontakt.io fornisce API Kio Cloud e SDK mobile per sostenere gli sviluppatori app; in particolare, per la localizzazione indoor provvede gli sviluppatori dell'API di Localizzazione e Occupazione appositamente dedicata.

Quest'API di Localizzazione e Occupazione restituisce dati sulla posizione, l'occupazione, la telemetria e i dati dei sensori. Utilizza URL orientati alle risorse prevedibili, accetta richieste con corpo codificato in formato di form, restituisce risposte codificate in formato JSON e utilizza codici di risposta standard HTTP, autenticazione e verbi.

Tutte le API di Kontakt.io utilizzano la chiave API di Kio Cloud per autenticare le richieste. Pertanto, per iniziare a sviluppare un'applicazione, si parte con la registrazione a Kio Cloud. A questo punto si procede con la configurazione delle API Streams, dove per Streams si intende quelle API che forniscono dati in tempo reale di Kio Cloud direttamente ai servizi streaming di terze parti.

Il modello delle Streams API è composto da canali e sottoscrizioni. Un canale rappresenta un servizio di streaming cloud di terze parti che raccoglie ed elabora i dati trasmessi in streaming da Kio Cloud. Una sottoscrizione rappresenta il tipo di dati in tempo reale di Kio Cloud trasmessi a un canale. Lo streaming consente l'utilizzo di più canali e sottoscrizioni, e le sottoscrizioni possono avere uno o più canali.

Per quanto concerne i canali, è possibile consumare i dati in tempo reale di Kio Cloud da una sottoscrizione di stream nei seguenti servizi di streaming cloud di terze parti: AWS Kinesis, Azure Event Hub e IBM Watson.

I dati riguardanti la posizione dei dispositivi vengono recepiti con timestamp tramite Kio Cloud Smart Location. Il Kio Cloud Smart Location è una rappresentazione gerarchica della disposizione fisica dell'ambiente, con ogni livello che fornisce una vista più dettagliata. Questa

topologia mappata della posizione, insieme ai dispositivi infrastrutturali di Kontakt.io, consente di determinare con precisione la posizione e la localizzazione di oggetti o persone e l'occupazione all'interno di un ambiente. La posizione poi è calcolata sfruttando i dati di posizione che includono posizioni attuali e storiche dei dispositivi, presenze e posizioni colocalizzate.

Al sito developer.kontakt.io si trova una guida precisa e con script esemplificativi per la creazione di applicazioni mobile a partire dalla piattaforma Kontakt.io.

2.7.1 Here Indoor Positioning

Here Indoor Positioning è un sistema di posizionamento indoor sviluppato da HERE Technologies, un'azienda specializzata in servizi di mappatura e localizzazione. Come suggerisce il nome, si tratta di una tecnologia che consente di determinare con precisione la posizione di una persona o di un dispositivo all'interno di edifici o strutture coperte, dove il segnale del GPS potrebbe non essere affidabile o disponibile.

Il sistema di posizionamento indoor di Here fa uso di diverse tecnologie per raggiungere la precisione richiesta. Una delle tecniche utilizzate è il tracciamento dei segnali Wi-Fi presenti nell'edificio. I dispositivi mobili, come gli smartphone, possono rilevare i segnali Wi-Fi emessi da punti di accesso specifici all'interno dell'edificio e inviare queste informazioni a un server centrale. Il server elabora quindi i dati raccolti e determina la posizione approssimativa dell'utente all'interno dell'edificio.

Oltre al tracciamento Wi-Fi, il sistema può fare uso di altre tecnologie come il Bluetooth Low Energy, i sensori inerziali e le mappe interne dettagliate dell'edificio per migliorare ulteriormente la precisione della posizione.

Here Indoor Positioning fornisce le API e gli SDK per sviluppare applicazioni smartphone. Si appoggia ai servizi di Azure Hub per soluzione IoT e codifica in linguaggio JSON.

3 I QR CODE E L'IDENTIFICATIVO DI DISPOSITIVI DOMOTICI

L'incremento della tecnologia e Industria 4.0 hanno permesso di sviluppare potenti accessori per gli smartphone. Nel capitolo precedente si è visto come negli ultimi anni gli smartphone sono stati dotati di diversi sistemi di LBS (Location Based Service), i quali forniscono diversi servizi a partire dalla localizzazione dell'utente. Qualsiasi sistema LBS ha bisogno di diversi componenti infrastrutturali per funzionare. Questi componenti sono: dispositivi mobili, rete di comunicazione, sistema di posizionamento, server di applicazioni e provider di dati (Hakimpour & Zardiny, 2014). I dati di posizione e di localizzazione possono essere ricavati da diversi tipi di fonti, nel nostro caso si è ampiamente studiata la tecnologia Bluetooth Low Energy.

Tra i diversi accessori dei moderni smartphone è comparsa la possibilità di utilizzare il nostro terminale mobile equipaggiato di fotocamera come *barcode reader*. Grazie ai progressi tecnologici degli ultimi decenni nel campo degli smartphone, i lettori di codici a barre basati su smartphone sono ora in grado di scannerizzare i codici a barre e possono quindi essere considerati come una svolta per il mondo commerciale. La tecnologia di lettura dei codici a barre basata su smartphone ha semplificato la nostra vita quotidiana ed è coinvolta in quasi tutti gli aspetti della nostra vita, tra cui l'industria, la sanità: sistemi di rilevamento e diagnostica clinica, l'istruzione, i produttori di alimenti e bevande, la microscopia/immagine, ecc. Il codice a barre è semplicemente un modello ben definito di linee o quadrati su uno sfondo a contrasto, utilizzato per memorizzare le informazioni sui prodotti. Quando il codice a barre viene scansionato con la fotocamera dello smartphone, le informazioni codificate vengono decodificate per fornire le informazioni memorizzate e analizzate con diverse applicazioni per smartphone. È opportuno ricordare che gli sviluppatori di applicazioni sono sempre più interessati a sviluppare applicazioni per smartphone per la scansione dei codici a barre, in grado di facilitare gli utenti nell'ottenere informazioni dettagliate sui prodotti attraverso la scansione dei codici a barre (Agrawal & Hussain, 2021).

Nelle fabbriche industriali, i sistemi di codici a barre sono utilizzati per vari processi, come il processo di produzione, l'inventario, la logistica ecc. Per quanto riguarda l'edilizia, questa tesi vuole iniziare uno studio mirato al rilevamento dell'identificativo di un dispositivo domotico, come può essere un ID BACnet, tramite applicazione barcode reader.

Mirarchi et al. hanno sviluppato un framework per il facility management che sfrutta la telecamera di uno smartphone in maniera simile a quanto si propone questa tesi. Gli autori hanno pensato ad un framework che si poggia sulla modellazione BIM combinata ai BMS: i sistemi di gestione e gli spazi dell'edificio-prova sono stati equipaggiati di beacon BLE che hanno permesso la localizzazione indoor del dispositivo di chiunque voglia segnalare un guasto. Inizialmente avevano pensato di assegnare a ciascun elemento dell'edificio (pareti, muri, porte, dispositivi domotici eccetera) un codice a barre che permettesse agli utenti dell'applicazione di inquadrare il codice attraverso il proprio smartphone e quindi poter ottenere le informazioni precise circa l'oggetto da riparare. Hanno deciso di semplificare lo schema dell'app in quanto le etichette con codici a barre sarebbero risultate poco estetiche e hanno proposto una

semplice fotografia del danno a seguito della localizzazione del cellulare. Hanno affidato poi all'operatore il compito di identificare l'oggetto in questione.

A differenza del caso di Mirarchi et al. i dispositivi domotici presi in considerazione per questo studio presentano già etichette con codici QR o a barre che possono essere sfruttate per pingare l'ID del dispositivo stesso. Ma prima di passare al caso applicativo vero e proprio si riportano gli aspetti principali del funzionamento dei codici a barre.

3.1 Codice a barre e QR code

Il codice a barre è un'immagine grafica in grado di memorizzare dati in schemi speciali costituiti da linee equidistanti di spessore variabile o da quadrati verticali e orizzontali. In altre parole, può essere definito come un identificatore comune in grado di memorizzare un dato/identificatore di codice a barre.

I dati codificati possono essere decodificati per ottenere le informazioni utili memorizzate utilizzando una macchina per la lettura dei codici a barre o uno smartphone con fotocamera ad alta risoluzione e un'applicazione specifica per la lettura dei codici a barre. Dal punto di vista simbolico, un codice a barre può essere classificato in due categorie:

- Codice a barre monodimensionale (1D): si compone di una serie di linee parallele (barre) separate da una certa distanza, con larghezze variabili e che deve essere scansionato lungo un'unica direzione per ottenere dati precisi;
- Codice a barre bidimensionale (2D): contiene moduli neri disposti in modo quadrato su uno sfondo bianco e che consiste nella regione di codifica e nei modelli di funzione.

Le figure 3.8 (A) e (B) mostrano rispettivamente i codici a barre lineari e bidimensionali.



Figura 3.8 (A) Codice a barre monodimensionale (lineare) e (B) codici a barre bidimensionali (a risposta rapida). (Agrawal & Hussain, 2021)

I primi codici ad essere stati utilizzati sono i codici a barre 1D, i quali, si è detto sono composti da una serie di barre verticali e spazi che variano in larghezza. Ogni carattere o cifra all'interno del codice a barre è rappresentato da una sequenza specifica di barre e spazi. La combinazione delle larghezze delle barre e degli spazi rappresenta i dati codificati.

I dati all'interno del codice a barre 1D sono codificati utilizzando algoritmi specifici. Ci sono diversi schemi di codifica, tra i più diffusi si annoverano: l'UPC (Universal Product Code), utilizzato normalmente nel commercio al dettaglio e per i beni di consumo, l'EAN nell'Unione Europea, e il Code 128, in grado di descrivere i caratteri ASCII 128 che è comunemente usato nella logistica. La maggior parte dei codici a barre comprende una cifra di verifica come parte del suo standard. Si usa per verificare che il codice sia completo, senza danni o informazioni mancanti. Funziona eseguendo un'operazione matematica sui dati all'interno del codice. Altri codici 1D, come il Code 39 (molto usato nel settore militare), il POSTNET (usato dal United States Postal Service®), il Codabar, e l'Interlacciato 2 di 5 presentano cifre di controllo opzionali.

Per leggere un codice a barre 1D, viene utilizzato un lettore di codici a barre. Il lettore emette un raggio di luce sul codice a barre e rileva le variazioni di luce riflessa dalle barre e dagli spazi. Queste variazioni vengono quindi convertite in un formato digitale interpretabile da un computer. Il software di decodifica analizza le sequenze di barre e spazi per recuperare i dati codificati.

A differenza dei sistemi di codici a barre lineari 1D, i codici a barre 2D sono strumenti economici per le industrie alimentari o per il marketing aziendale, che facilitano il follow-up pre e post-vendita dei loro prodotti. I codici a barre 2D sono anche chiamati codici QR e rappresentano una versione avanzata del loro predecessore (codici a barre 1D), grazie alla maggiore capacità di memorizzazione e alla rapida leggibilità.

Per le correzioni geometriche e l'identificazione incoraggiante, vengono utilizzati modelli di funzione e i livelli di correzione degli errori, i modelli di maschera e le versioni sono racchiusi in formati. Il livello di correzione degli errori consente ai lettori di codici QR di decodificare in modo accettabile i dati, anche se si tratta di simboli sporchi o danneggiati. Finora esistono 4 livelli di correzione degli errori (L, M, Q e H) e sono state lanciate diverse versioni di codici QR (dalla versione 1 alla versione 40) a seconda delle dimensioni dei moduli. La versione 1 è il codice QR più piccolo, con dimensioni di 21×21 moduli, e per ogni versione successiva le dimensioni del codice QR aumentano di 4 moduli. La versione 40 del codice QR è la più grande con dimensioni di 177×177 moduli.

La leggibilità dei codici QR dipende da diversi fattori, tra cui le dimensioni del codice QR, la distanza di scansione e il numero di moduli, ovvero, se le informazioni memorizzate sono maggiori, i codici QR sono più densi e la lettura è più difficile. Tuttavia, la capacità di memorizzazione di un codice QR dipende dalla versione, dai livelli di correzione degli errori e dal tipo di dati da codificare. In generale, i dati possono essere codificati in tre tipi di modalità: numerica, alfanumerica e byte e ognuno di questi può essere codificato in determinati caratteri. Ad esempio, per un solo dato numerico, il codice QR creato può essere codificato fino a 7089 caratteri, mentre i dati alfanumerici e i byte possono essere codificati rispettivamente per 4296 e 2953 caratteri.

I codici 2-D più diffusi sono: DataMatrix, usato nei settori aerospaziale, della difesa,

dell'editoria e dal servizio postale degli Stati Uniti; MaxiCode, codice basato su punti usato per le applicazioni logistiche; codici QR, usati nei settori automobilistico e di marketing commerciale; codici Aztec, usati dalle biglietterie e dalle società di autonoleggio.

Il Quick Response Code (QR) è stato sviluppato in Giappone dalla Denso Corporation nel 1994 e successivamente riconosciuto come standard. Il codice QR è stato approvato come standard AIM, JIS e ISO. Pertanto, il codice QR viene utilizzato in diverse applicazioni, come la produzione, la logistica, le vendite e le applicazioni.

3.2 Applicazioni smartphone per lettura di barcode e QR code

L'evoluzione della tecnologia ha giocato un ruolo significativo nell'abilità degli smartphone di essere utilizzati come lettori di codici a barre.

Il primo ambito in cui si è vista un avanzamento notevole a favore della lettura dei codici è stato proprio nelle capacità hardware: gli smartphone moderni sono dotati di fotocamere di alta qualità, che offrono una risoluzione e una nitidezza sufficienti per catturare i dettagli dei codici a barre. Inoltre, le prestazioni dei processori e la quantità di memoria disponibile sono notevolmente migliorati nel corso degli anni, consentendo ai telefoni di elaborare rapidamente le immagini e decodificare i codici a barre.

Non da meno è stato lo sviluppo di nuovi algoritmi di decodifica: per consentire agli smartphone di leggere una vasta gamma di codici a barre, sono stati sviluppati algoritmi di decodifica avanzati. Questi algoritmi analizzano l'immagine catturata dalla fotocamera del telefono e identificano il tipo di codice a barre presente; quindi, estraggono i dati in esso contenuti.

Per quanto riguarda i barcode e QR code stessi si può affermare che nel corso degli anni, i produttori di codici a barre hanno stabilito standard comuni per le diverse tipologie di codici a barre. Questo ha semplificato la decodifica e l'interpretazione dei codici a barre da parte delle applicazioni dei dispositivi mobili. Ad esempio, il codice a barre UPC è ampiamente utilizzato nei prodotti di consumo e rappresenta un formato standard riconosciuto dalla maggior parte delle applicazioni di scansione di codici a barre. Inoltre, i codici a barre sono diventati sempre più popolari e ampiamente utilizzati in vari settori come il commercio al dettaglio, la logistica, la gestione delle scorte e molto altro ancora. Ciò ha portato a un aumento della richiesta di strumenti di lettura dei codici a barre, e gli smartphone hanno dimostrato di essere dispositivi convenienti ed efficaci per soddisfare tale esigenza.

Sono state quindi sviluppate diverse applicazioni di scansione di codice a barre per smartphone. Queste app utilizzano l'algoritmo di decodifica integrato per leggere e interpretare i codici a barre. Le applicazioni possono fornire funzionalità aggiuntive, come la memorizzazione dello storico delle scansioni, la creazione di elenchi di desideri o l'integrazione con servizi di acquisto online.

Ci si domanda quindi a questo punto quali siano le componenti dell'architettura di un'applicazione smartphone per la lettura dei codici tramite QR code. Nel contesto della lettura di codici a barre per smartphone, la progettazione architettonica del software definisce i componenti e le comunicazioni tra i componenti che costituiscono l'app.

Il processo di utilizzo delle fotocamere degli smartphone per la lettura dei codici a barre prevede alcune fasi. Innanzitutto, gli utenti devono attivare l'app di lettura dei codici a barre. Alcune app hanno un'interfaccia di sistema personalizzata in cui i diversi utenti otterranno informazioni diverse in base alle loro esigenze e condizioni. Le informazioni personalizzate e il profilo dell'utente possono essere ottenuti utilizzando le credenziali di social network quali Facebook e Twitter. Altre app possono attivare automaticamente la fotocamera dello smartphone una volta attivate.

In secondo luogo, gli utenti devono tenere la fotocamera dello smartphone fotocamera dello smartphone sul codice a barre stampato e allineare la finestra del mirino (cioè, la cornice del codice a barre). Apparirà una linea di scansione per leggere i codici a barre. Nel caso in cui la linea di scansione non appaia, l'utente deve continuare ad allineare la finestra del mirino sul codice a barre. L'algoritmo di localizzazione dei codici a barre esegue questo processo.

In terzo luogo, il decodificatore di codici a barre traduce le righe in una serie di numeri ed esegue un processo di convalida. Passa i numeri di codice a barre ad altri moduli delle applicazioni per la ricerca e la manipolazione dei dati. Se venissero recuperati codici a barre non corretti, le applicazioni dovrebbero essere in grado di chiedere agli utenti di allineare di nuovo la fotocamera dello smartphone sul codice a barre.

Infine, i moduli estesi per i codici a barre devono essere in grado di visualizzare le informazioni sullo schermo dello smartphone gli utenti.

L'architettura generica per applicazioni di lettura di codici a barre per smartphone è presentata in questo paragrafo per evidenziare i componenti essenziali e il flusso di comunicazione tra di essi. L'architettura comprende tre componenti essenziali: la fotocamera dello smartphone, l'interfaccia di programmazione dell'applicazione (API) e un server di applicazioni.

La fotocamera di uno smartphone è una fotocamera posteriore integrata negli smartphone per l'acquisizione di immagini. È un tipo di sensore di cui sono dotati i moderni smartphone. La fotocamera dello smartphone viene utilizzata per catturare l'immagine del codice a barre o QR code. Ha bisogno di un lettore di codici a barre API: moduli software sviluppati da programmatori di terze parti integrati in altre applicazioni.

L'API facilita la comunicazione della fotocamera dello smartphone con l'intera struttura delle applicazioni di lettura dei codici a barre. Inoltre, l'API per la lettura dei codici a barre lettura dei codici a barre o QR code riduce lo sforzo di programmazione degli sviluppatori per costruire i moduli di lettura dei codici a barre, rendendo così il lavoro più conveniente.

Infine, le applicazioni di lettura dei codici a barre per smartphone richiedono un server applicativo per ospitare il programma ed eseguire la logica e le operazioni commerciali delle applicazioni. È il componente delle applicazioni che interagisce con lo smartphone degli utenti e con altri componenti esterni come i database dei prodotti³⁹ attraverso una rete di comunicazione. È anche il componente che conserva le informazioni e le attività degli utenti, compresi i registri. L'application server è il cervello dell'applicazione che elabora gli input e produce gli output previsti per gli utenti. Il programma o il codice presente sull'application server eseguirà la ricerca del prodotto nel database dei codici a barre in base alle informazioni del codice a barre decodificato.

La Figura 3.9 mostra un esempio di architettura di applicazione smartphone per lettura di codici a barre o QR con i suoi componenti e il flusso di comunicazione. Dalla Figura 3.9, l'architettura dell'applicazione per la lettura di codici a barre per smartphone replica l'architettura client-server a tre livelli. In questa architettura, uno smartphone è un client che richiede un servizio da un server di applicazioni. Il client deve avere installato ed eseguito un'applicazione mobile nativa. Quando il server riceve la richiesta, elabora la richiesta e invia un'altra richiesta al database dei codici a barre dei prodotti in seguito alla richiesta originale del client. Il server risponde alla richiesta del client dopo aver ricevuto una risposta dal database dei codici a barre dei prodotti. Un'API per il riconoscimento delle immagini dei codici a barre è un componente aggiuntivo che esegue il riconoscimento e l'elaborazione del codice a barre (Katuk et al., 2019).

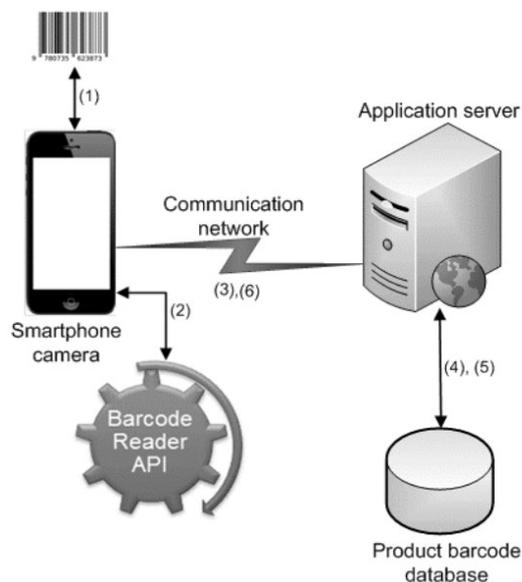


Figura 3.9 Architettura generica per le applicazioni per la lettura di codici a barre.(Katuk et al., 2019)

³⁹ Il database dei codici a barre dei prodotti è un archivio che memorizza le informazioni sui prodotti, tra cui il codice a barre, il nome del prodotto, il nome dell'utente e il nome del prodotto, la marca e il produttore.

3.3 ID BACnet nei QR code dei dispositivi domotici

Nell'ambito della domotica i QR code vengono utilizzati dai produttori per facilitare il fruitore del servizio nel ricavare le informazioni rispetto al dispositivo, in particolare i codici identificativi dei dispositivi per i differenti protocolli scelti.

Questa tesi prende come esempio prodotti domotici che utilizzano il protocollo BACnet, che distingue i differenti dispositivi attraverso un codice identificativo ID univoco. Il termine "Device ID" (ID dispositivo) è l'abbreviazione di Device Identifier (Identificatore dispositivo) e indica la porzione di Instance Number (Numero istanza) della proprietà Object_Identifier dell'oggetto BACnet Device. L'ID dispositivo è un valore non volatile che viene scelto e configurato da qualcuno nel sito in cui è installato il prodotto BACnet. L'ID dispositivo viene utilizzato per la risoluzione degli indirizzi di livello rete in indirizzi di livello applicazione, comunemente chiamato "binding"⁴⁰.

Pertanto, per non incorrere in errori è opportuno capire a fondo la distinzione importante tra l'Object_Identifier, l'Object_Name e l'Object_Type, tre proprietà di uno stesso dispositivo domotico che devono essere presenti in ogni dispositivo BACnet.

L'Object_Name è una stringa di testo che ha una capacità unica. I dispositivi BACnet possono trasmettere interrogazioni per i dispositivi che contengono oggetti con uno specifico Object_Name. Ciò può semplificare notevolmente l'impostazione del progetto. Più specificatamente, le proprietà Vendor_Name, Vendor_Identifier e Model_Name forniscono il nome del produttore e il modello del dispositivo.

La proprietà Object_Identifier, che è richiesta in ogni oggetto BACnet, è utile per referenziare univocamente riferimento a ciascun oggetto di un dispositivo. L'Object_Identifier è un codice a 32 bit composto da due dati: un Object type e un Instance number dell'oggetto. La figura 3.9 mostra la suddivisione dei bit tra Object type e Instance number della proprietà Object_Identifier.

⁴⁰ Il binding è il processo di creazione di connessioni tra i dispositivi. Un dispositivo deve conoscere il segmento di rete BACnet e l'indirizzo MAC di un altro dispositivo. BACnet richiede una relazione unica relazione uno-a-uno tra una data istanza di dispositivo e una coppia (numero di rete, indirizzo MAC). Sebbene i binding del dispositivo possano essere creati in modo statico (da una configurazione umana), quando ci sono molti dispositivi, questo può rappresentare una grande sfida di manutenzione se i numeri di rete o gli indirizzi MAC cambiano. In genere i dispositivi ricordano solo l'istanza del dispositivo ed eseguono il binding dinamico dei dispositivi. Il binding dinamico dei dispositivi richiede l'uso dei servizi BACnet Who-Is e I-Am, in modo che un client possa trasmettere una richiesta "Chi è il dispositivo X" e solo l'istanza del dispositivo X risponderà con "I-Am dispositivo X". La risposta contiene il numero di rete attuale del dispositivo, indirizzo MAC e informazioni aggiuntive (come il Vendor ID). Questo permette ai dispositivi di scoprirsi reciprocamente dinamicamente.

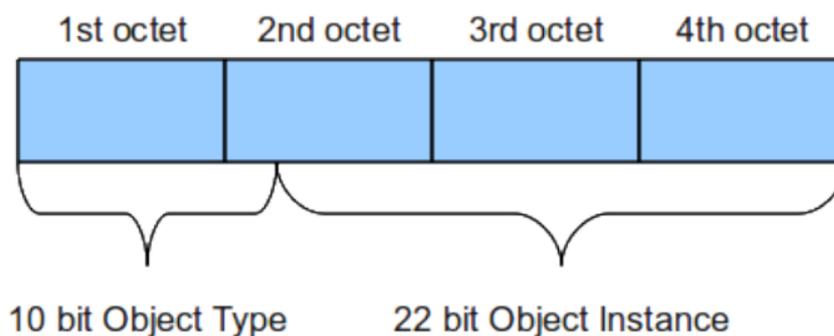


Figura 3.10. Suddivisione dei bit della proprietà Object_Identifier in Object Type e Object Instance(Karg, s.d.).

Gli Object Type possono essere qualsiasi tipo di oggetto standard BACnet e sono enumerati da 0 a 127, oppure possono essere un tipo non standard numerato da 128 a 1023. Ad esempio, l'Object Type Dispositivo è enumerato come 8. Il fornitore di un dispositivo può scegliere quali tipi di oggetti utilizzare in un dispositivo. La tabella 9 a fine paragrafo riporta i primi 54 Object Type.

Lo standard specifica che l'Object Instance Number è di 22 bit: 0-4194303. Inoltre, afferma che "Nessun oggetto deve avere un Object_Identifier con un numero di istanza di 4194303. Il fornitore può scegliere quali numeri di istanza di oggetto utilizzare per ciascun oggetto. Fa eccezione il numero di istanza dell'oggetto Dispositivo, che può essere scelto inizialmente dal fornitore, ma deve essere configurabile e sopravvivere all'alimentazione e al reset del controllore (non volatile).

Lo standard BACnet ci dice che "ogni oggetto all'interno di un singolo dispositivo BACnet deve avere un valore unico per la proprietà Object_Identifier". L'unico metodo per ottenere un ID dispositivo univoco a livello di sistema da 0 a 4194302 è quello di rendere questo valore configurabile presso il sito dell'edificio in cui è installato il prodotto BACnet. Questo può essere in vari modi, da un'interfaccia utente sul prodotto alla semplice possibilità di configurare l'oggetto Device Object_Identifier tramite il servizio BACnet WriteProperty. Questo ID del dispositivo, che deve essere univoco in tutto il sistema, fornisce un meccanismo di riferimento per ogni dispositivo nella rete del sistema di controllo.

La tabella 8 chiarisce la differenza tra Object_Identifier, Object_Type e Object_Name. Il tipo di oggetto riportato è un dispositivo, che pertanto avrà come Object Identifier la distinzione tra Object_Type "Device" (normalmente corrisponde al numero 8) e instance number "2729"; in nome dell'oggetto letto da BACnet sarà "RE1 Penthouse" che si differenzia dal nome dato

dal produttore al dispositivo “BASR-8M”.

Tabella 8. Esempio di codifica BACnet di un dispositivo domotico. (Table 1 — There are 25 BACnet object types. The BAS Remote uses five which are highlighted., s.d.)

Property Identifier	Value
Object_Identifier	(Device, Instance 2749)
Object_Name	“RE1 Penthouse”
Object_Type	DEVICE
System_Status	(OPERATIONAL)
Vendor_Name	“Contemporary Controls”
Vendor_Identifier	245
Model_Name	“BASR-8M”

In conclusione, nel momento dell’acquisto di un dispositivo domotico predisposto per BACnet il produttore consegna al cliente il prodotto corredato sia del PICS, all’interno del quale sono scritte le proprietà BACnet del dispositivo, sia di un codice QR che, se scansionato, fornisce l’Object_Identifier del dispositivo. È importante non confondere tale QR code con il codice a barre che serve al venditore per identificare il dispositivo secondo il Model_Name scelto da produttore.

In questo studio si prende in considerazione il primo codice, il QR code con l’Object_Identifier, per poi sviluppare un’applicazione mobile in grado di associare un dispositivo domotico con il suo identificativo BACnet alla sua posizione nel modello omologo digitale BIM dell’edificio. Il tema viene trattato nel capitolo successivo.

Tabella 9 Lista ed enumerazione Object Type BACnet fino a 54.(BACnet - 10.4.21 BACnetObjectTypeEnum, s.d.)

Name	Value	Description
analog-input	0	This object type represents physical analog input information, e. g. a sensor value.
analog-output	1	This object type represents physical analog output information, e. g. a 0-10V output.
analog-value	2	This object type represents an analog value (virtual) information, e. g. a setpoint value.
binary-input	3	This object type represents a binary input information, e. g. the state of a lamp or fuse.
binary-output	4	This object type represents a binary output information, e. g. a switch.
binary-value	5	This object type represents a binary value (virtual) information, e. g. an error state.
calendar	6	This object type represents calendar (date-based) information.
command	7	This object type represents command (scene) information.
device	8	This object type represents the physical device. It provides information like the local clock, the vendor, model-name and more.
event-enrollment	9	This object type is used to apply event monitoring in addition to the intrinsic reporting, e. g. to implement warning limits.
file	10	This object type represents files, e. g. the current configuration or persistent data.
group	11	This object type represents a group of objects local to the device.

loop	12	This object type represents controls loops, e. g. a PI or PID loop.
multi-state-input	13	This object type represents a physical multistate input information, e. g. a local operating mode switch.
multi-state-output	14	This object type represents a physical multistate output information, e. g. an operating mode switch controlled by the PLC.
notification-class	15	This object type represents an alarm class to notify recipients.
program	16	This object type represents the PLC program.
schedule	17	This object type represents a schedule (time based) used to specify weekly and/or exception schedule actions.
averaging	18	This object type represents an averaging object which provides statistic information.
multi-state-value	19	This object type represents a multistate value (virtual) information, e. g. program parameter.
trend-log	20	This object type represents a trendlog object support a single channel.
life-safety-point	21	This object type represents initiating and indicating devices in fire, life safety and security applications.
life-safety-zone	22	This object type represents an arbitrary group of BACnet Life Safety Point and Life Safety Zone objects in fire, life safety and security applications.
accumulator	23	This object type represents accumulated (impulse) values.
pulse-converter	24	This object type represents a converted impulse information, e. g. energy consumption in kWh.
event-log	25	This object type represents an eventlog buffer, e. g. to store alarms locally.
global-group	26	This object type represents a group of objects in one or more devices.

trend-log-multiple	27	This object type represents a trendlog object supporting multiple channels.
load-control	28	This object type represents the externally visible characteristics of a mechanism for controlling load requirements.
structured-view	29	This object type represents a user-oriented object hierarchy.
access-door	30	This object type represents a door in access-control systems.
unassigned	31	n/a
access-credential	32	This object type represents credentials in access-control systems.
access-point	33	This object type represents an access point in access-control systems.
access-rights	34	This object type represents the access rights in access-control systems.
access-user	35	This object type represents the user information in access-control systems.
access-zone	36	This object type represents the zone in access-control systems.
credential-data-input	37	This object type represents the credential input (e. g. a card-reader) in access-control systems.
network-security	38	removed n/a
bitstring-value	39	This object type represents a bitstring information.
characterstring-value	40	This object type represents a string information.
date-pattern-value	41	This object type represents a date pattern. The pattern value 255 can be used as a wildcard.
date-value	42	This object type represents a specific single date information (day, month, year-1900, day-of-week).
datetime-pattern-value	43	This object type represents a combination of date and time supporting patterns.

datetime-value	44	This object type represents a combination of a specific date and time.
integer-value	45	This object type represents a signed integer value.
large-analog-value	46	This object type represents a large analog (8 BYTE LREAL) value.
octetstring-value	47	This object type represents an octetstring (hexadecimal) information.
positive-integer-value	48	This object type represents a positive integer (UNSIGNED) value.
time-pattern-value	49	This object type represents a time value supporting patterns.
time-value	50	This object type represents a specific time (hour, minute, second, hundredth of seconds).
notification-forwarder	51	This object type represents the characteristics required for the re-distribution of event notifications.
alert-enrollment	52	This object type represents the information required for managing information alerts from a BACnet device.
channel	53	This object type represents a channel in lighting applications.
lighting-output	54	This object type represents a lighting device.

SVILUPPO DI UN'APP SMARTPHONE PER L'ACQUISIZIONE DELL'ID BACNET

1 CASO STUDIO APPLICATIVO

Il caso studio applicativo si propone di fornire uno strumento d'appoggio per la gestione degli edifici che presentino un Building Management System. Si è scelto di studiare il caso in cui i BMS comunichino tramite protocollo BACnet. Il tentativo di questo studio è quindi lo sviluppo di un'applicazione mobile che permetta di identificare i dispositivi domotici collegati al controller principale (un PLC) per conoscere con esattezza a quale dispositivo o oggetto BACnet corrisponde l'identificativo registrato dal PLC.

È stato creato un modello BIM esemplificativo che simuli il processo che poi può essere esteso ad un edificio di maggiori dimensioni. Il software BIM con il quale si è sviluppato tale modello è Revit 2023. Il modello si compone di una stanza di sedici metri quadrati popolata da terminali domotici che, per rendere lo studio più realistico, sono stati scelti visitando i siti delle aziende più conosciute che producano oggetti domotici e che siano inserite tra le duecentoventisei riconosciute da BACnet. La schermata di Revit è stata riproposta nell'immagine 4.1.

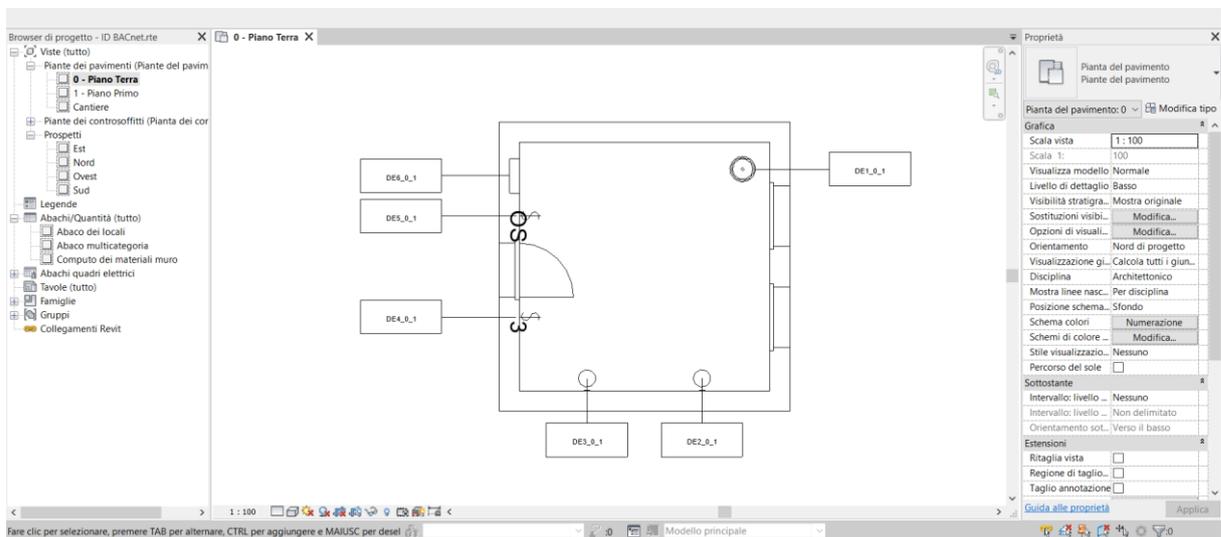


Figura 4.1 Schermata Revit, pianta della stanza popolata da dispositivi domotici.

I terminali domotici sono:

- Il pannello di controllo Desigo Control Point PXM50.E⁴¹ della Siemens che è progettato per semplificare il funzionamento e il monitoraggio di riscaldamento, ventilazione, climatizzazione, illuminazione e oscuranti in edifici di piccole e medie dimensioni. Il protocollo di implementazione BACnet (PICS) del prodotto⁴² è presente nel sito di BACnet (figura 4.2);



Figura 4.2. Pannello di Controllo Desigo Control Point PXM50.E della Siemens. (HIT, s.d.)

- Il sensore NS Series Temperature and Humidity Network Zone and Discharge Air⁴³ della Johnson, il quale è capace di rilevare il movimento all'interno della stanza, anche di questo prodotto è disponibile il PICS⁴⁴ (figura 4.3);



Figura 4.3 Sensore NS Series Temperature and Humidity Network Zone and Discharge Air della Johnson.

⁴¹https://hit.sbt.siemens.com/RWD/app.aspx?RC=HQEU&lang=en&MODULE=Product&ACTION=ShowGroup&KEY=HIT_Prod_Grp_2016718

⁴² https://www.bacnetinternational.net/catalog/manu/siemens/DCP_PXME_BTL_PICS_EN.pdf

⁴³ https://cgproducts.johnsoncontrols.com/cat_pdf/1900350.pdf

⁴⁴ https://cgproducts.johnsoncontrols.com/met_pdf/12011103.pdf

- L'interruttore a tre vie della Schneider Electric KNX push-button module, 1-gang, System M⁴⁵ (figura 4.4);

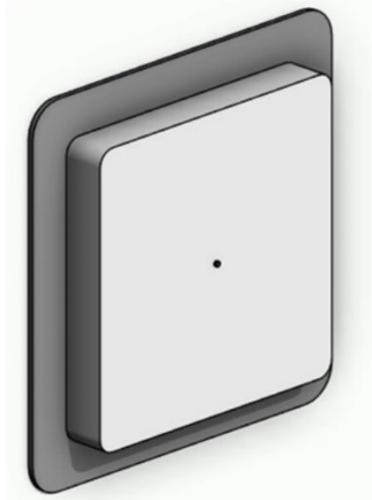


Figura 4.4 Interruttore a tre vie della Schneider Electric KNX push-button module, 1-gang, System M

- Le lampadine connesse della Philips E27⁴⁶ e E14⁴⁷ (figura 4.5), che dal momento che non sono idonee al protocollo BACnet, hanno bisogno di un gateway per comunicare con il PLC.



Figura 4.5 Lampadine connesse della Philips, a sinistra la E27, a destra la E14. (Lampadine intelligenti | Philips Hue IT, s.d.)

⁴⁵ <https://www.se.com/ww/en/product/MTN625199/knx-pushbutton-module-1gang-system-m/>

⁴⁶ <https://www.philips-hue.com/it-it/p/hue-white-a60---lampadina-connessa-e27---800/8719514329843>

⁴⁷ <https://www.philips-hue.com/it-it/p/hue-white-candela---lampadina-connessa-e14/8719514320666>

1.1 Impostazione progetto Revit

A seguito della modellazione della stanza e degli oggetti descritti al paragrafo precedente, il progetto è stato arricchito con parametri condivisi. Sono stati scelti proprio i parametri condivisi poiché sono definizioni di parametri utilizzabili in più famiglie e progetti. Dopo l'aggiunta di un parametro condiviso ad una famiglia o un progetto, è possibile utilizzarlo come parametro della famiglia o del progetto. La definizione di un parametro condiviso è archiviata in un file separato (non nel progetto, né nella famiglia); di conseguenza, il parametro condiviso è protetto dalle modifiche. Per tale motivo, i parametri condivisi possono essere provvisti di etichette e inclusi negli abachi.

Sono stati creati i parametri condivisi: Type_Mark, Model_Name, Vendor_Name, Vendor_Identifier, Object_Identifier e Object_Type.

Il Type_Mark è un identificativo che serve per distinguere il singolo dispositivo elettrico all'interno del modello BIM. Tale parametro condiviso è composto da tre sigle divise da un underscore: la prima è l'acronimo di dispositivo elettrico (DE) accompagnato da un numero a partire da uno, la seconda corrisponde al piano in cui si trova il dispositivo e la terza al numero della stanza. Per la numerazione dei dispositivi si è partiti dall'angolo in alto a destra, quindi, ad esempio, il primo dispositivo elettrico, corrispondente alla lampadina connessa E14 della Philips, avrà Type_Mark DE1_0_1. L'elenco dei dispositivi e i Type_Mark associati sono presenti nella tabella 10. Il parametro condiviso Type_Mark è stato compilato per ogni istanza corrispondente agli oggetti domotici ed è stato inserito all'interno delle etichette multi-categoria associate ai dispositivi elettrici, in modo da identificare senza difficoltà l'oggetto in questione.

Tabella 10. Elenco Type_Mark associati ai corrispondenti dispositivi elettrici.

Dispositivo Elettrico	Type_Mark
Lampadina Connessa E14	DE1_0_1
Lampadina Connessa E27	DE2_0_1
Lampadina Connessa E27	DE3_0_1
KNX push-button module, 1-gang, System M	DE4_0_1
NS Series Temperature and Humidity Network Zone and Discharge Air	DE5_0_1
Desigo Control Point	DE6_0_1

Il Model_Name e il Vendor_Name corrispondono al nome del prodotto e al nome del produttore, mentre il Vendor_Identifier è il numero con cui BACnet cataloga i produttori BACnet. Nel caso applicativo Johnson corrisponde al 5, Siemens al 7 e Schneider Electric al 10; dal momento che Philips non rientra tra i venditori BACnet non ha un corrispettivo Vendor_Identifier. Anche questi parametri sono stati inseriti nel modello.

Per quanto riguarda l'Object_Identifier e l'Object_Type per la spiegazione si fa riferimento al Capitolo 3, paragrafo 3.2. L'Object_Identifier è univoco e si trova all'interno del PICS, il quale viene consegnato al cliente al momento della vendita, pertanto, insieme all'Object_Type non può essere compilato nel modello. Attraverso questo studio verrà costruita un'applicazione mobile che rileva l'Object_Identifier (o altrimenti chiamato ID BACnet) e compila il modello Revit con tale dato; l'Object_Type verrà ricavato dall'ID BACnet.

I parametri condivisi sono visibile all'interno di un abaco multi-categoria in cui sono stati isolati le istanze che presentavano il Type Mark (figura 4.6).

Abaco multicategoria X					
<Abaco multicategoria>					
A	B	C	D	E	F
Type_Mark	Model_Name	Vendor_Name	Vendor_Identifier	Object_Identifier	Object_Type
DE6_0_1	Desigo Control Point	Siemens Building Techno	7		
DE4_0_1	KNX push-button module, 1-gang,	Schneider Electric	10		"
DE3_0_1	Lampadina Connessa E27	Philips			"
DE2_0_1	Lampadina Connessa E27	Philips			"
DE1_0_1	Lampadina Connessa E14	Philips			"
DE5_0_1	NS Series Temperature and Humid	Johnson	5		

Figura 4.6. Schermata Revit con abaco multi-categoria iniziale.

1.2 Impostazione applicazione smartphone

Per lo sviluppo dell'applicazione smartphone ci si è appoggiati a Google AppSheet, il quale lavora anche attraverso i fogli di lavoro Google Sheet.

Pertanto, si è utilizzato il plug-in DiRootsOne per esportare l'abaco multi-categoria in Google Sheet. DiRootsOne è un'unica applicazione che include otto plugin Autodesk Revit gratuiti per aumentare la produttività di Revit. DiRootsOne consente una perfetta interoperabilità tra i plug-in, aprendo le porte a nuovi flussi di lavoro. In particolare, SheetLink è un componente aggiuntivo gratuito di Autodesk Revit per esportare i dati del modello da Revit a fogli di calcolo Excel e Google Sheets e importarli nuovamente.



Figura 4.7. Logo DiRootsOne.(DiRootsOne - 8 productivity Revit Plugins by DiRoots, s.d.)

Sistemi di georeferenziazione indoor tramite tecnologia Bluetooth: possibili implementazioni BMS e BIM based.
Andreuzza Virginia

Per esportare in Google Sheet l'abaco multi-categoria, si cerca nella barra Revit il modulo DiRootsOne, del quale si utilizza la casella SheetLink. Una volta cliccato su SheetLink, si apre una finestra di dialogo in cui si cerca la casella "Schedules", spuntando la voce "abaco multi categoria", compariranno sulla destra i parametri selezionati per l'abaco. Ora, in basso a destra è possibile esportare l'abaco attraverso "export", spuntando "Open Excel File After Export" e cliccando su "Export to Google", verrà creato un foglio Google sull'account associato. Il procedimento è visibile in figura 4.8.

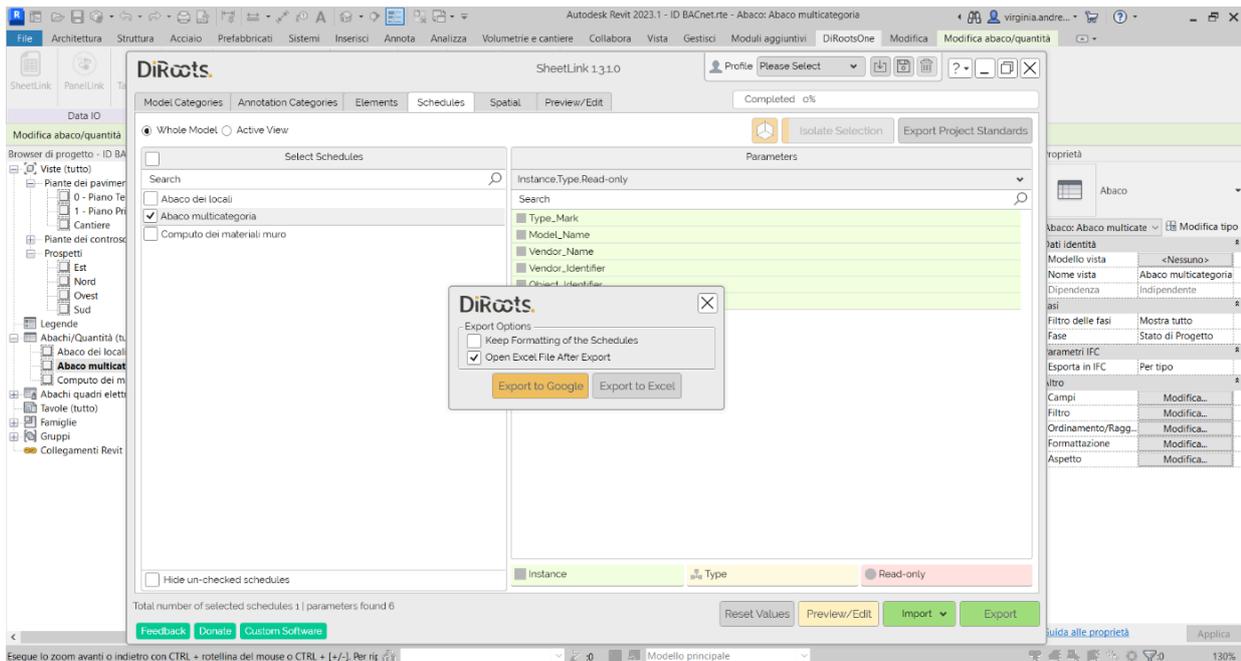
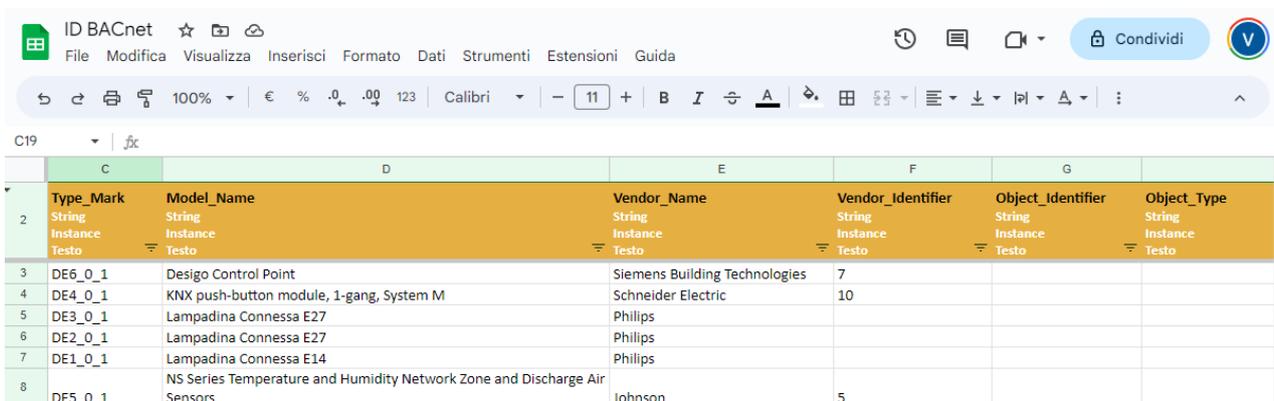


Figura 4.8. Procedimento per esportare da Revit a Google un abaco multi-categoria.

L'abaco risulta ora salvato nel Drive come foglio di lavoro modificabile e rintracciabile tra i propri fogli di Google Sheet (figura 4.9).



Type_Mark	Model_Name	Vendor_Name	Vendor_Identifier	Object_Identifier	Object_Type
String	String	String	String	String	String
Instance	Instance	Instance	Instance	Instance	Instance
Testo	Testo	Testo	Testo	Testo	Testo
3	DE6_0_1	Desigo Control Point	Siemens Building Technologies	7	
4	DE4_0_1	KNX push-button module, 1-gang, System M	Schneider Electric	10	
5	DE3_0_1	Lampadina Connessa E27	Philips		
6	DE2_0_1	Lampadina Connessa E27	Philips		
7	DE1_0_1	Lampadina Connessa E14	Philips		
8	DE5_0_1	NS Series Temperature and Humidity Network Zone and Discharge Air Sensors	Johnson	5	

Figura 4.9 Foglio Google Sheet ricavato dall'abaco multi-categoria di Revit tramite DiRootsOne.

A questo punto le basi per sviluppare l'applicazione tramite AppSheet sono state

impostate. Ma, perché l'applicazione funzioni in modo corretto, sono necessari i QR code da cui ottenere le informazioni del dispositivo domotico, in particolare l'Object_Identifier. Tali QR code sono unici e ottenibili solo al momento dell'acquisto del dispositivo e del sistema domotico, pertanto non sono disponibili in rete.

Ai fini di questo studio è stato deciso di generare i QR code in maniera più verosimile possibile. L'ID BACnet, o altrimenti chiamato Object_Identifier, è composto dall'Object_Type e dall'Object_InstanceNumber. Per attenerci alla realtà si è scelto di assegnare l'Object_Type facendo riferimento alla tabella 9: è stato possibile rintracciare alcuni dispositivi tra i 54 presenti in tabella, ai restanti è stato assegnato il numero corrispondente al generico "device" (8). L'Object_InstanceNumber invece è stato assegnato di fantasia. In tabella 11 sono presenti i dispositivi presenti nel modello Revit e i loro corrispondenti Object_Type e Object_InstanceNumber.

Tabella 11 Dispositivi domotici presenti nel modello Revit e i rispettivi Object Type e Instance Number

Dispositivi domotici	Object_Type	Object_InstanceNumber
Lampadina Connessa E14	54 (lighting-output ⁴⁸)	102
Lampadina Connessa E27	54 (lighting-output)	101
Lampadina Connessa E27	54 (lighting-output)	100
KNX push-button module, 1-gang, System M	8 (device ⁴⁹)	456
NS Series Temperature and Humidity Network Zone and Discharge Air Sensors	8 (device)	123
Desigo Control Point	33 (access-point ⁵⁰)	123

⁴⁸ Questo Object Type rappresenta un dispositivo di illuminazione

⁴⁹ Questo Object Type rappresenta un dispositivo fisico. Fornisce informazioni come l'orologio locale, il fornitore, il nome del modello e altro ancora.

⁵⁰ Questo Object Type rappresenta un punto di accesso in un sistema di controllo degli accessi.

Avendo assegnati gli Object Type e InstanceNumber, l'Object_Identifier è stato è stato composto dalla somma dei due. È stato quindi compilato un altro foglio Google Sheet con i seguenti dati: Type_Mark, Model_Name, ID BACnet e QR code corrispondente.

Il QR code è stato creato attraverso la funzione =image("https://chart.googleapis.com/chart?") compilabile nella barra di Google Sheet. La tabella 12 riporta la schermata con i QR code creati tramite Google Sheet per ogni dispositivo.

Tabella 12 Dispositivi domotici e corrispondenti QR code

1	Type_Mark	Model_Name	ID BACnet	QR code
2	DE6_0_1	Desigo DXR2 Automation Stations	033 123	
3	DE4_0_1	KNX push-button module, 1-gang, System M	008 456	
4	DE3_0_1	Lampadina Connessa E27	054 100	
5	DE2_0_1	Lampadina Connessa E27	054 101	
6	DE1_0_1	Lampadina Connessa E14	054 102	
7	DE5_0_1	eries Temperature and Humidity Network Zone and Discharg Sensors	008 123	

1.3 Applicazione smartphone per acquisizione ID BACnet

L'applicazione, nominata "BACnet ID", è stata sviluppata tramite AppSheet. AppSheet è una piattaforma di sviluppo no-code che consente anche a chi non ha esperienza di programmazione di creare applicazioni web o per dispositivi mobili. È possibile creare app da AppSheet a partire da origini dati come Fogli Google, Excel, Cloud SQL, Salesforce e altri connettori simili. Le attività che gli utenti svolgono nelle app vengono sincronizzate con le origini dati connesse.

È stata scelta la piattaforma AppSheet poiché permette la creazione di applicazioni a partire da fogli Google Sheet, che a loro volta possono essere stati esportati da abachi Revit tramite DiRootsOne. Sempre Tramite DiRootsOne è possibile poi importare i dati di Google Sheet, che a loro volta possono essere compilati dall'applicazione.

Si è partiti dal foglio Google presente nell'immagine 4.9 (a sua volta esportato da Revit tramite DiRootsOne): nella barra principale si è cliccato su “Estensioni”, “AppSheet” e infine “Crea un'app” (fig. 4.10).

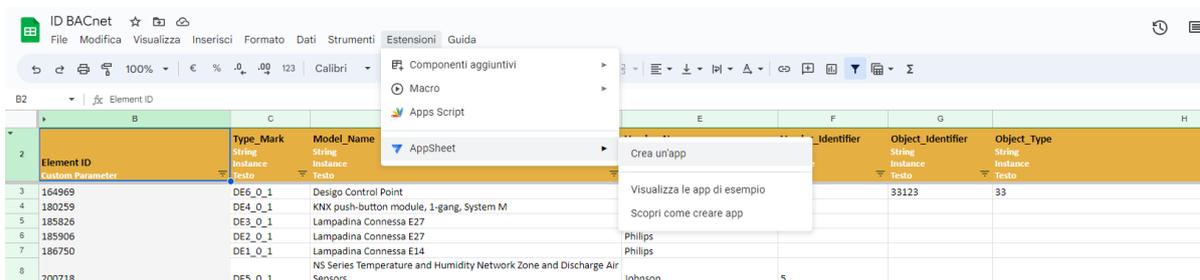


Figura 4.10 Procedimento per creare un'applicazione AppSheet a partire da Google Sheet

I dispositivi domotici appariranno con i loro parametri associati in una schermata preimpostata di AppSheet, rintracciabile nel menù a sinistra in “Data” e poi “Columns”. In questo studio è stato scelto di visualizzare gli elementi secondo il proprio TypeMark e Model_Name, quindi è stato spuntato LABEL? per il Type_Mark e KEY? per il Model_Name. Sono stati resi visibili tutti i parametri ad eccezione dell'Object_Type, di cui in seguito verrà trattato.

La figura 4.11 mostra le impostazioni base dell'applicazione a sinistra, mentre a destra è visibile la schermata che apparirà una volta aperta l'app dallo smartphone.

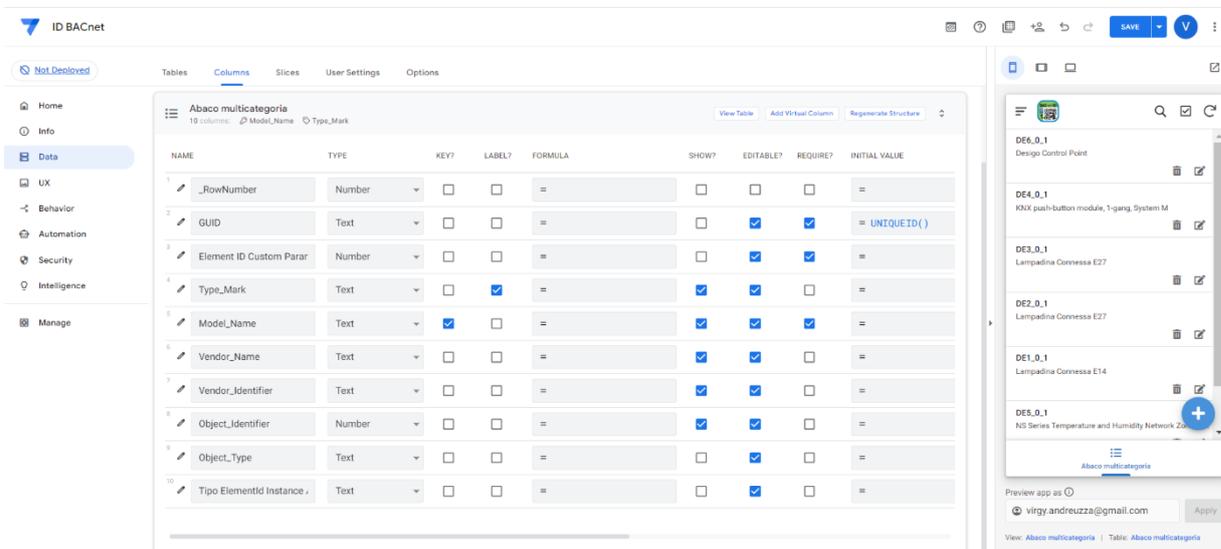


Figura 4.11 Schermata Google AppSheet delle impostazioni base per applicazione “BACnet ID”

Si noti nell'immagine 4.11 la voce Object_Identifier: essendo un parametro che verrà compilato sfruttando la tecnologia di scannerizzazione QR code, è necessario che i dati rilevati e trascritti siano compatibili, a tal fine sotto la colonna TYPE è stato scelto “Number” attraverso il menù a tendina. Inoltre, cliccando sull'icona della matita a lato del nome si è data la possibilità di scannerizzare il valore dell'Object_Identifier tramite QR code alla voce “Other Properties” e

spuntando Scannable. Il processo per la rilevazione dell'Object_Identifier è visibile

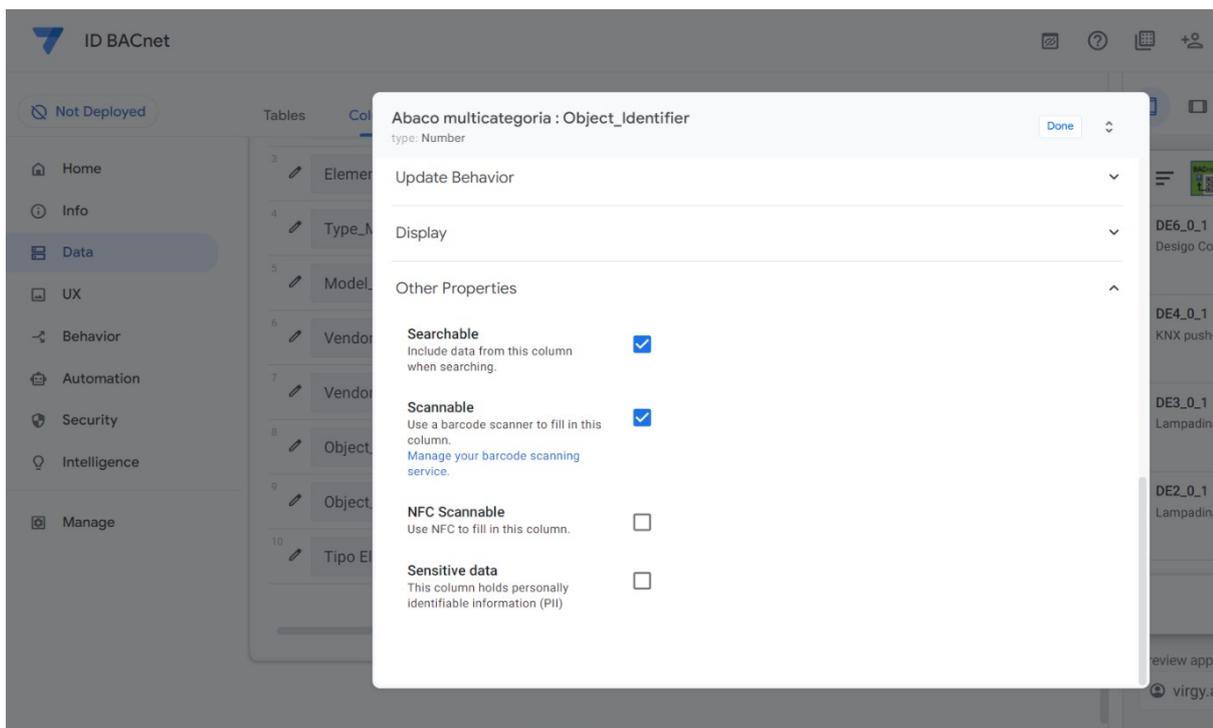


Figura 4.12 Impostazioni per rendere scannerizzabile il valore Object_Identifier

nell'immagine 4.12.

Le impostazioni affinché l'applicazione funzioni in modo corretto sono state settate e si può iniziare a rilevare gli ID BACnet tramite applicazione smartphone. Il download della stessa avviene con un link inviato alla mail personale utilizzata per creare l'applicazione.

All'apertura dell'applicazione smartphone si accede ad una schermata in cui sono presenti i dispositivi domotici identificabili attraverso il proprio Type_Mark e, in una dimensione di font ridotta, il Model_Name. Tale schermata è visibile nell'immagine 4.13 presente alla pagina successiva.

È stato preferito il Type_Mark come parametro per l'identificazione perché, in assenza del sistema di geolocalizzazione indoor che dovrebbe localizzare il dispositivo e fare apparire nella schermata il dispositivo o l'elenco dei dispositivi presenti per tali coordinate, il Type_Mark riesce a restituire un'indicazione precisa circa quale terminale domotico si trovi in una determinata posizione se ci si confronta con il modello Revit. L'immagine 4.14 mostra la posizione degli oggetti domotici in pianta a cui sono state assegnate delle etichette identificative. Si noti ad esempio che, considerando il Pannello di Controllo della Siemens, corrispondente al Type_Mark DE6_0_1, non è confondibile con altri terminali domotici essendo un prodotto unico e distinguibile dai restanti prodotti, pertanto il Type_Mark risulta quasi una caratteristica in più. Nel caso invece della Lampadina Connessa E27 nell'angolo in basso a destra (con Type Mark DE2_0_1), essa potrebbe essere confusa con la lampadina alla sua sinistra in

assenza di Type_Mark.

Sistemi di georeferenziazione indoor tramite tecnologia Bluetooth: possibili implementazioni BMS e BIM based.
Andreuzza Virginia

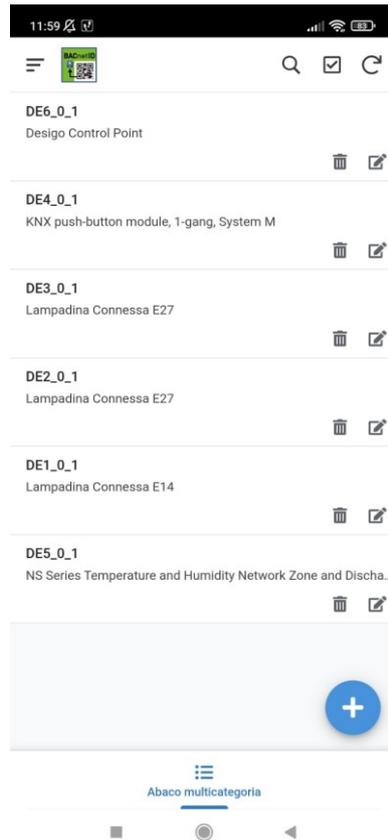


Figura 4.14 Schermata smartphone d’inizio dell’applicazione BACnet ID

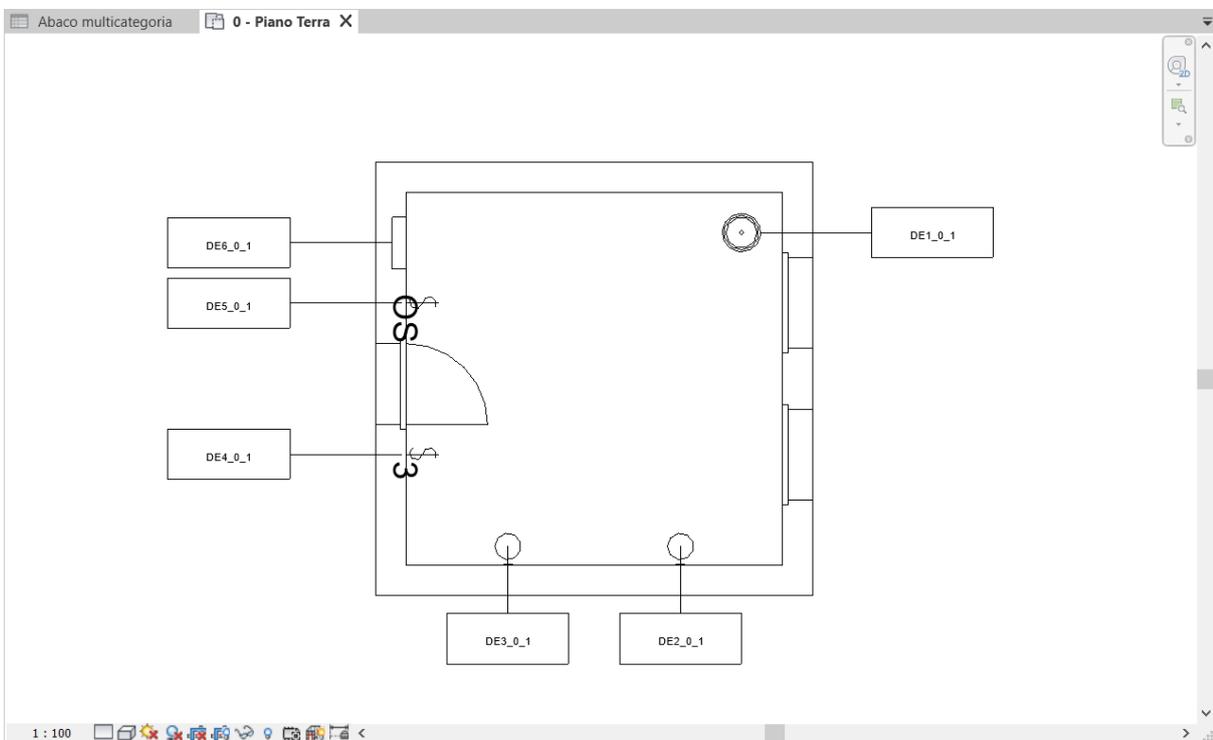
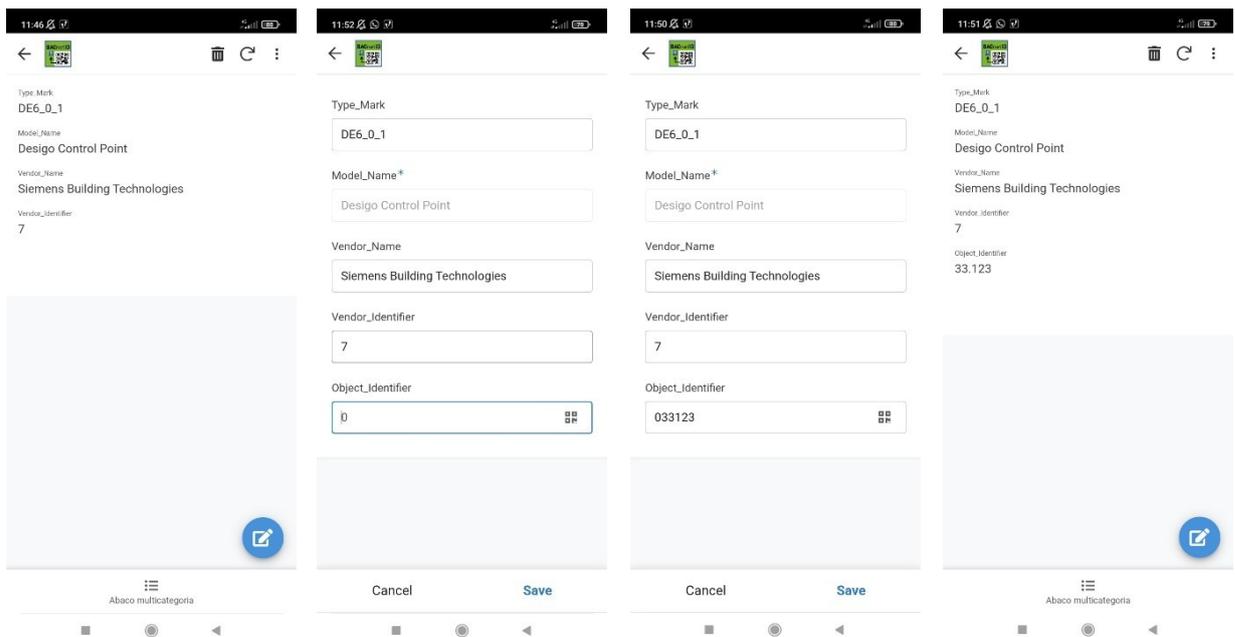


Figura 4.13 Dispositivi domotici in pianta e corrispondenti etichette con Type_Mark

Si può procedere ora con l'acquisizione dell'identificativo BACnet tramite applicazione smartphone. Si prenda come caso esemplificativo il Pannello di Controllo della Siemens, con Type_Mark DE6_0_1, si selezioni il dispositivo tramite applicazione (fig 4.15 a) e si clicchi sulla matita in basso a destra per modificare i dati. Alla voce Object_identifier si clicchi sull'icona rappresentante un codice QR code, essa aprirà la fotocamera dello smarthone per scannerizzare il QR code del dispositivo (fig 4.15 b e c). Una volta aquisito l'identificativo BACnet si dia il comando "Save" per salvare il dato all'interno dell'applicazione (fig. 4.15 d).



(a) (b) (c) (d)

Figura 4.15 (a) Selezione del dispositivo domotico, (b) Icona e voce per rilevare l'identificativo BACnet tramite fotocamera smartphone, (c) rilevazione dell'Object_Identifier e (d) dato salvato nel modo corretto all'interno dell'applicazione.

Salvando il dato all'interno dell'applicazione in pochi secondi verrà automaticamente compilato anche il campo all'interno del foglio Google Sheet. Nell'immagine 4.16 si nota che non solo è stato trasferito il dato relativo all'Object_Identifier, ma anche è stata compilata la casella dell'Object_Type. Come già detto più volte, l'Object_Type, corrisponde ai primi numeri dell'Object_Identifier, più precisamente ai primi tre se si considerano dispositivi già registrati in BACnet, di più nel caso di dispositivi proprietari. Nel caso in esame si hanno dispositivi con Object_Type di una o due cifre massimo. È stato scelto quindi di compilare il campo Object_Type del foglio Google Sheet estraendo il numero dalle prime cifre dell'Object_Identifier. Per fare ciò è stata usata la funzione offerta da Google Sheet STRINGA.ESTRAI(stringa; inizia_da; estrai_lunghezza) e si è distinto il caso in cui l'Object_Type fosse da una o due cifre settando il punto di inizio uguale ma lunghezze differenti. L'immagine 4.17 mostra invece tutti i cambi dell'abaco completati sia nella voce Object_Identifier sia nella

Sistemi di georeferenziazione indoor tramite tecnologia Bluetooth: possibili implementazioni BMS e BIM based.

Andreuzza Virginia

voce Object_Type.

Type_Mark	Model_Name	Vendor_Name	Vendor_Identifier	Object_Identifier	Object_Type
DE6_0_1	Desigo Control Point	Siemens Building Technologies	7	33123	33
DE4_0_1	KNX push-button module, 1-gang, System M	Schneider Electric	10		
DE3_0_1	Lampadina Connessa E27	Philips			
DE2_0_1	Lampadina Connessa E27	Philips			
DE1_0_1	Lampadina Connessa E14	Philips			
DE5_0_1	NS Series Temperature and Humidity Network Zone and Discharge Air Sensors	Johnson	5		

Figura 4.17 Object_Identifier del dispositivo DE6_0_1 compilato di Google Sheet in automatico dall'app

Type_Mark	Model_Name	Vendor_Name	Vendor_Identifier	Object_Identifier	Object_Type
DE6_0_1	Desigo Control Point	Siemens Building Technologies	7	33123	33
DE4_0_1	KNX push-button module, 1-gang, System M	Schneider Electric	10	8456	8
DE3_0_1	Lampadina Connessa E27	Philips		54101	54
DE2_0_1	Lampadina Connessa E27	Philips		54100	54
DE1_0_1	Lampadina Connessa E14	Philips		54102	54
DE5_0_1	NS Series Temperature and Humidity Network Zone and Discharge Air Sensors	Johnson	5	8123	8

Figura 4.16 Foglio Google Sheet compilato in tutti i suoi campi

Acquisiti i dati in maniera corretta, è ora importante poterli trasferire all'interno del file Revit. Per fare ciò si ritorni al modello e nella barra dei comandi si cerchi nuovamente DiRootsOne. Si clicchi su SheetLink, Schedule e si spunti la voce abaco multi-categoria, esattamente come si era fatto per esportare l'abaco in Google Sheet. In questo caso si clicchi però su "Import" e poi su "Import from Google", si aprirà una finestra su cui si selezioni a destra "il mio drive" e in seguito il file in cui si era esportato l'abaco (fig.4.18). Si dia infine il comando "Import". Quando appare la finestra con la conferma che il file è stato importato in maniera corretta, l'abaco multi-categoria appare completo in tutti i campi (fig. 4.19).

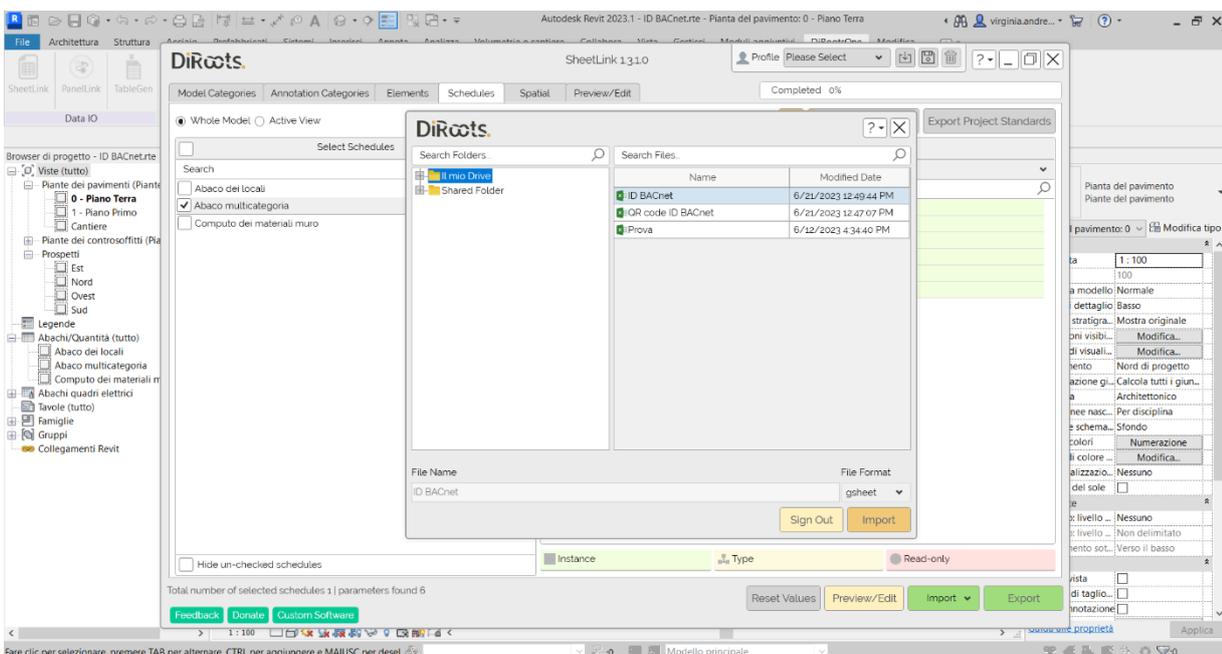


Figura 4.18 Processo di importazione del file Google Sheet in Revit tramite DiRootsOne

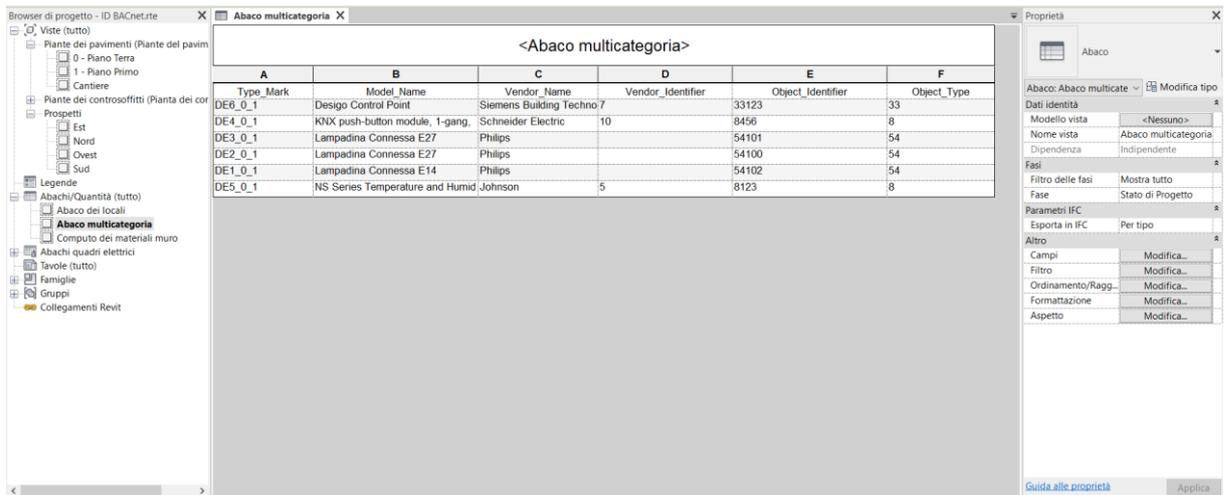


Figura 4.19 Abaco Revit compilato in modo corretto tramite importazione da Google Sheet con DiRootsOne

2 ANALISI CRITICA DEI RISULTATI

Nel capitolo precedente sono stati descritti in dettaglio i passaggi per la creazione e l'attivazione di un'applicazione in grado di acquisire correttamente l'identificativo BACnet di un dispositivo domotico all'interno di una rete BACnet e per la compilazione del file dell'omologo digitale in Revit. Questo capitolo offre invece una panoramica dei risultati ottenuti e delle funzionalità dell'applicazione.

L'intento dell'applicazione era fornire uno strumento utile e di semplice applicazione per la rilevazione dell'Object_Identifier. Quest'ultimo serve al PLC - controller dei BMS – per indentificare i vari dispositivi che esso controlla: questi, una volta agganciati alla rete vengono memorizzati dal PLC stesso tramite Object_Identifier. Il BMS quindi, ultimata l'installazione dei dispositivi domotici, presenterà la lista completa degli stessi.

Il controller però, una volta riconosciuti i dispositivi domotici come oggetti dal protocollo BACnet, non ne distingue la posizione all'interno dell'edificio, rendendo più difficile all'utente l'associazione dell>ID BACnet con l'effettivo dispositivo. Ad esempio, nel caso in cui il PLC segnalasse che un dispositivo luce ha smesso di funzionare, un operatore dovrebbe scendere in campo e testare ogni singola lampadina fino ad arrivare a trovare quella che ha subito un danno, pur conoscendone l>ID BACnet.

L'applicazione BACnet ID ha dimostrato di saper porre rimedio a questo spreco di energie e tempi. L'interfaccia dell'applicazione è stata progettata in modo intuitivo, consentendo agli utenti di avviare la scansione dei dispositivi BACnet con pochi semplici passaggi. I risultati vengono visualizzati in tempo reale e il foglio di calcolo viene automaticamente aggiornato con le informazioni rilevate.

L'applicazione di rilevamento dell'Object_Identifier BACnet si è dimostrata estremamente utile per semplificare il processo di identificazione e gestione dei dispositivi domotici. Grazie alla sua interfaccia user-friendly e alla funzionalità di ricompilazione automatica del foglio di calcolo, e poi dell'abaco Revit, l'applicazione offre un notevole vantaggio in termini di efficienza e precisione.

Inoltre, tramite l'applicazione sviluppata è stato possibile far dialogare tre mondi: il mondo reale, popolato dai dispositivi domotici con i loro QR code, il mondo BIM con l'omologo digitale del mondo reale, e infine i BMS.

Per fare ciò ci si è appoggiati a strumenti che hanno permesso che i passaggi fossero portati a termine con semplicità e sicurezza. In primo luogo, Revit 2023 si è rivelato software accurato per la modellazione di un prototipo d'esempio. Ha consentito la creazione di un modello collaborativo tra le diverse discipline e ha permesso di arricchire i dispositivi domotici con parametri che indicassero le proprietà BACnet.

DiRootsOne è stato poi un plug-in necessario per la corretta esportazione dell'abaco Revit in Google Sheet, e viceversa per l'importazione, una volta compilato il foglio di lavoro.

Proprio attraverso l'esportazione dell'abaco in Google Sheet è stato poi intuitivo lo sviluppo dell'applicazione in Google AppSheet.

In conclusione, l'applicazione BACnet ID si è dimostrata un valido strumento per semplificare l'identificazione e la gestione dei dispositivi domotici all'interno di una rete BACnet. Grazie alla sua funzionalità di scansione e registrazione automatica degli ID BACnet, l'applicazione offre un approccio efficiente e preciso per la gestione di BMS. Le potenziali applicazioni di questa app sono ampie e possono essere utilizzate in diversi contesti, come ad esempio l'installazione e la manutenzione di reti BACnet in edifici commerciali o residenziali. L'automazione del processo di rilevamento e registrazione degli ID BACnet riduce notevolmente il tempo e gli sforzi richiesti per completare queste attività.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

1 SINTESI DELLA RICERCA

La presente tesi ha esplorato i nuovi sviluppi dell'Edilizia 4.0, concentrandosi principalmente sulla Building Automation e sui modelli digitali degli impianti domotici. In particolare, sono stati approfonditi i progressi nell'integrazione dei dati acquisiti direttamente dal campo, che hanno aperto le porte alla promettente applicazione della realtà aumentata.

Nel contesto dell'edilizia 4.0 e della Building Automation, i BMS rappresentano un elemento cruciale per la gestione intelligente degli edifici. Grazie alla loro capacità di raccogliere e analizzare dati provenienti da sensori, dispositivi e sistemi di controllo distribuiti nell'edificio, i BMS consentono di ottenere una visione globale e dettagliata delle prestazioni energetiche e operative dell'edificio stesso.

Un'altra delle componenti chiave dell'Edilizia 4.0 è il Building Information Modeling (BIM), un processo che permette di creare, gestire e condividere informazioni digitali sulle caratteristiche fisiche e funzionali di un edificio. Il BIM consente a tutti gli attori coinvolti in un progetto edilizio di lavorare in modo collaborativo e coordinato, riducendo gli errori e ottimizzando le risorse.

Uno dei vantaggi chiave dei BMS nell'ambito dell'edilizia 4.0 è la loro capacità di comunicare e interagire con altre tecnologie e sistemi, come il BIM. L'integrazione dei BMS all'interno dei modelli BIM consente di rappresentare in modo dettagliato e interattivo i sistemi di gestione dell'edificio. Ciò significa che è possibile visualizzare e analizzare le informazioni relative ai sensori, ai dispositivi di controllo, ai circuiti elettrici, ai sistemi di riscaldamento e raffreddamento, e molti altri aspetti che contribuiscono al funzionamento dell'edificio.

Si è visto poi come l'evoluzione dell'Edilizia 4.0 non si è fermata ai BMS o al BIM. Grazie alla crescente disponibilità di dispositivi come smartphone e tablet dotati di funzionalità di realtà aumentata, è emersa una nuova opportunità per migliorare ulteriormente il settore. La realtà aumentata consente di sovrapporre informazioni digitali al mondo reale, aprendo nuove prospettive nel campo dell'edilizia.

Alla luce di queste premesse si è infine sviluppata l'applicazione "BACnet ID" che ha dimostrato essere capace di acquisire dati direttamente dalla realtà per arricchire un modello BIM, omologo digitale di un impianto elettrico collegato ad un BMS.

2 SVILUPPI FUTURI

L'applicazione BACnet ID a conclusione di questo studio ha denotato la capacità di rilevare l'identificativo BACnet e di trasferirlo al digital twin dell'impianto elettrico.

Tuttavia, il processo si dimostra funzionale e completo nel caso in cui il modello BIM di partenza sia di dimensioni contenute e la quantità di dispositivi ridotta, ma, nel caso in cui il progetto iniziale crescesse di dimensioni e aumentasse il numero di dispositivi domotici, l'applicazione risulterebbe un'infinita lista di dispositivi da confrontare via via con il modello BIM di partenza. In tal caso quindi il processo apparirebbe più difficoltoso e si rischierebbe di incorrere molto facilmente in errori.

Per questo motivo è stato pensato ad una possibile evoluzione dell'applicazione, volta ad una facilitazione del processo di acquisizione di dati senza errori. A tale proposito sono stati studiati i metodi di geolocalizzazione degli smartphone; la tecnologia Bluetooth Low Energy è stata considerata la migliore se integrata ad algoritmi di calcolo della posizione come ad esempio la trilaterazione.

Pertanto, una possibile evoluzione dell'applicazione BACnet ID vede come primo passaggio la geolocalizzazione indoor dello smartphone, che confrontata con il modello BIM, permette di accedere al dispositivo o alla lista di dispositivi presenti in quelle determinate coordinate. In questo modo non solo si potrebbe facilitare il processo di raccolta dei dati, ma anche si potrebbero ridurre i tempi e gli errori che derivano dalla doppia verifica della corrispondenza tra il dispositivo e il suo omologo digitale e/o tra la posizione dello stesso nella realtà e nel modello BIM.

ALLEGATO 1 – FORMATO PICS DA COMPILARE FORNITO DA BACNET - ANNEX A – PROTOCOL IMPLEMENTATION
CONFORMANCE STATEMENT (NORMATIVE)

Andreuzza Virginia

- BACnet Access Control Controller (B-ACC)
- BACnet Advanced Elevator Controller (B-AEC)
- BACnet Elevator Controller (B-EC)
- BACnet Elevator Monitor (B-EM)
- BACnet Router (B-RTR)
- BACnet Gateway (B-GW)
- BACnet Broadcast Management Device (B-BBMD)
- BACnet Access Control Door Controller (B-ACDC)
- BACnet Access Control Credential Reader (B-ACCR)
- BACnet Secure Connect Hub (B-SCHUB)

- BACnet General (B-GENERAL)

BACnet	Interoperability	Building	Blocks	Supported	(Annex K):

Segmentation Capability:

- Able to transmit segmented messages Window Size _____
- Able to receive segmented messages Window Size _____

Standard Object Types Supported:

An object type is supported if it may be present in the device. For each standard Object Type supported provide the following data:

- 1) Whether objects of this type are dynamically creatable using the CreateObject service
- 2) Whether objects of this type are dynamically deletable using the DeleteObject service
- 3) List of the optional properties supported
- 4) List of all properties that are writable where not otherwise required by this standard
- 5) List of all properties that are conditionally writable where not otherwise required by this standard
- 6) List of proprietary properties and for each its property identifier, datatype, and meaning
- 7) List of any property range restrictions

BACnet Data Link Layer Options:

- ARCNET (ATA 878.1), 2.5 Mb. (Clause 8)
- ARCNET (ATA 878.1), EIA-485 (Clause 8), baud rate(s) _____
- BACnet IP, (Annex J)
- BACnet IP, (Annex J), BACnet Broadcast Management Device (BBMD)
- BACnet IP, (Annex J), Network Address Translation (NAT Traversal)
- BACnet IPv6, (Annex U)
- BACnet IPv6, (Annex U), BACnet Broadcast Management Device (BBMD)
- BACnet/ZigBee (Annex O) _____
- Ethernet, ISO 8802-3 (Clause 7)
- LonTalk, ISO/IEC 14908.1 (Clause 11), medium: _____
- MS/TP master (Clause 9)
 - Master Slave
 - Non-isolated transceiver Isolated transceiver
 - Local 47K ohms bias resistors None Other: _____

Transceiver unit loading: 1 1/2 1/4 1/8

Data rates: 9600 19200 38400 57600 76800 115200

Point-To-Point, EIA 232 (Clause 10), baud rate(s): _____

Point-To-Point, modem, (Clause 10), baud rate(s): _____

BACnet Secure Connect (Annex AB)

BACnet Secure Connect Node If direct connections are supported:

Maximum number of simultaneous direct connections initiated: _____

Maximum number of simultaneous direct connections accepted: _____

BACnet Secure Connect Hub Function

Maximum number of simultaneous hub connections accepted: _____

HTTPS Proxy Support List the types of HTTPS proxies supported: _____

Additional cipher suites supported beyond those required for TLS V1.3 The additional cipher suites supported using the cipher suite names as of the TLS Cipher Suite Registry at IANA (See RFC 8446): _____

Additional Transport Layer Security versions other than V1.3 supported The TLS versions other than V1.3 that are supported, including the supported cipher suites for the version beyond those required, using the cipher suite names as defined by the TLS version supported: _____

Generates private keys internally and provides matching certificate signing requests.

DNS host name resolution supported (RFC 1123)

mDNS host name resolution supported (RFC 6762)

Other:

Device Address Binding:

Is static device binding supported? (This is currently necessary for two-way communication with MS/TP slaves and certain other devices.) Yes No

Networking Options:

Router, Clause 6 - List all routing configurations, e.g., ARCNET-Ethernet, Ethernet-MS/TP, etc.

Annex H, BACnet Tunneling Router over IP

Character Sets Supported:

Indicating support for multiple character sets does not imply that they can all be supported simultaneously.

ISO 10646 (UTF-8)

IBM™/Microsoft™ DBCS

ISO 8859-1

ISO 10646 (UCS-2)

ISO 10646 (UCS-4)

JIS X 0208

Gateway Options:

If this product is a communication gateway, describe the types of non-BACnet equipment/networks(s) that the gateway supports:

If this product is a communication gateway which presents a network of virtual BACnet devices, a separate PICS shall be provided that describes the functionality of the virtual BACnet devices. That PICS shall describe a superset of the functionality of all types of virtual BACnet devices that can be presented by the gateway.

Sistemi di georeferenziazione indoor tramite tecnologia Bluetooth: possibili implementazioni BMS e BIM based.
Andreuzza Virginia

BIBLIOGRAFIA

-
- Adam, G. K. (2019). DALI LED driver control system for lighting operations based on raspberry Pi and kernel modules. *Electronics (Switzerland)*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS8091021>
- Agrawal, A., & Hussain, C. M. (2021). Smartphone as barcode reader. In *Smartphone-Based Detection Devices: Emerging Trends in Analytical Techniques* (pagg. 85–102). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823696-3.00008-8>
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/J.COMNET.2010.05.010>
- BACnet - 10.4.21 BACnetObjectTypeEnum. (s.d.). Recuperato 7 giugno 2023, da https://reference.opcfoundation.org/BACnet/v200/docs/10.4.21#_Ref379294995
- Badenhop, C. W., Graham, S. R., Ramsey, B. W., Mullins, B. E., & Mailloux, L. O. (2017). The Z-Wave routing protocol and its security implications. *Computers & Security*, 68, 112–129. <https://doi.org/10.1016/J.COSE.2017.04.004>
- Barker, S., Irwin, D., & Shenoy, P. (2017). Pervasive Energy Monitoring and Control Through Low-Bandwidth Power Line Communication. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(5), 1349–1359. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2703916>
- Bellido-Outeiriño, F. J., Quiles-Latorre, F. J., Moreno-Moreno, C. D., Flores-Arias, J. M., Moreno-García, I., & Ortiz-López, M. (2016). Streetlight control system based on wireless communication over DALI protocol. *Sensors (Switzerland)*, 16(5). https://doi.org/10.3390/S16050597/SENSORS_16_00597_PDF.PDF
- Bluetooth Low Energy – Regulatory Aspects Document (RAD) | Bluetooth® Technology Website.* (s.d.). Recuperato 19 aprile 2023, da <https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-low-energy-regulatory-aspects-document-rad/>
- Bluetooth Technology Overview | Bluetooth® Technology Website.* (s.d.). Recuperato 19 aprile 2023, da <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>
- Calantonea, R. J., Cavusgila, S. T., & Zhaob, Y. (2002). Machine Translated by Google Machine Translated by Google. *Articulo De Investigación Científica*, 31, 515–524.
- Canovas, S. R. M., Chermont, M. G., & Cugnasca, C. E. (s.d.). *EFITA/WCCA 2005 Vila Real, Portugal 2005 EFITA/WCCA JOINT CONGRESS ON IT IN AGRICULTURE Remote Monitoring and Actuation Based on LonWorks® Technology.* Recuperato 15 marzo 2023, da <http://www.purechoice.com>
- Chen, D., Doumeingts, G., & Vernadat, F. (2008). Architectures for enterprise integration and

interoperability: Past, present and future. *Computers in Industry*, 59(7), 647–659.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPIND.2007.12.016>

Cos'è e come funziona KNX - inDomus.it. (s.d.). Recuperato 16 marzo 2023, da
<https://indomus.it/componenti/knx/>

del Sarto, N., Cesaroni, F., di Minin, A., & Piccaluga, A. (2022). One size does not fit all. Business models heterogeneity among Internet of Things architecture layers. *Technology Analysis and Strategic Management*, 34(7), 787–802.
<https://doi.org/10.1080/09537325.2021.1921138>

Dinh, T. M. T., Duong, N. S., & Sandrasegaran, K. (2020). Smartphone-Based Indoor Positioning Using BLE iBeacon and Reliable Lightweight Fingerprint Map. *IEEE Sensors Journal*, 20(17), 10283–10294. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2989411>

DiRootsOne - 8 productivity Revit Plugins by DiRoots. (s.d.). Recuperato 14 giugno 2023, da
<https://diroots.com/revit-plugins/dirootsone/>

Do, T. H., & Yoo, M. (2016). An in-Depth Survey of Visible Light Communication Based Positioning Systems. *Sensors 2016, Vol. 16, Page 678, 16(5)*, 678.
<https://doi.org/10.3390/S16050678>

Domingues, P., Carreira, P., Vieira, R., & Kastner, W. (2016). Building automation systems: Concepts and technology review. *Computer Standards & Interfaces*, 45, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/J.CSI.2015.11.005>

Duong, N. S., & Thi, T. M. D. (2021). Smartphone indoor positioning based on enhanced BLE beacon multi-lateration. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 19(1), 51–62. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.V19I1.16275>

Esquivel-Vargas, H., Caselli, M., & Peter, A. (2017). Automatic deployment of specification-based intrusion detection in the BACnet Protocol. *CPS-SPC 2017 - Proceedings of the 2017 Workshop on Cyber-Physical Systems Security and Privacy, co-located with CCS 2017*, 17, 25–36. <https://doi.org/10.1145/3140241.3140244>

Faragher, R., & Harle, R. (2015). Location fingerprinting with bluetooth low energy beacons. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33(11), 2418–2428.
<https://doi.org/10.1109/JSAC.2015.2430281>

Ferreira, J. C., Resende, R., & Martinho, S. (2018). Beacons and BIM models for indoor guidance and location. *Sensors (Switzerland)*, 18(12). <https://doi.org/10.3390/s18124374>

Fouladi, B., & Ghanoun, S. (s.d.). *Security Evaluation of the Z-Wave Wireless Protocol.*

Gao, M. (2022). Smart campus teaching system based on ZigBee wireless sensor network. *Alexandria Engineering Journal*, 61(4), 2625–2635.
<https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2021.09.001>

Gomez, C., & Paradells, J. (2010). Wireless home automation networks: A survey of

- architectures and technologies. *IEEE Communications Magazine*, 48(6), 92–101. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2010.5473869>
- Gonzato, A. J. (s.d.). *BIM BMS BEMS*. Recuperato 10 novembre 2022, da <https://www.smartbuildingitalia.it/wp-content/uploads/2019/07/Gonzato-Jacopo.pdf>
- Granzer, W., & Kastner, W. (2012). Information modeling in heterogeneous Building Automation Systems. *IEEE International Workshop on Factory Communication Systems - Proceedings, WFCS*, 291–300. <https://doi.org/10.1109/WFCS.2012.6242577>
- Graveto, V., Cruz, T., & Simões, P. (2022). Security of Building Automation and Control Systems: Survey and future research directions. *Computers and Security*, 112. https://doi.org/10.1016/J.COSE.2021.102527/SECURITY_OF_BUILDING_AUTOMATION_AND_CONTROL_SYSTEMS_SURVEY_AND_FUTURE_RESEARCH_DIRECTIONS.PDF
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/J.FUTURE.2013.01.010>
- Hakimpour, F., & Zardiny, A. Z. (2014). Location based service in indoor environment using Quick Response Code Technology. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(2W3), 137–140. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-2-W3-137-2014>
- Hersent, O., Boswarthick, D., & Elloumi, O. (2011). The Internet of Things: Key Applications and Protocols. *The Internet of Things: Key Applications and Protocols*. <https://doi.org/10.1002/9781119958352/FORMAT/EPUB>
- HIT. (s.d.). Recuperato 14 giugno 2023, da https://hit.sbt.siemens.com/RWD/app.aspx?RC=HQEU&lang=en&MODULE=Product&ACTION=ShowGroup&KEY=HIT_Prod_Grp_2016718
- Home - buildingSMART Technical. (s.d.). Recuperato 7 marzo 2023, da <https://technical.buildingsmart.org/>
- Hui, L., Hao, Z., & Daogang, P. (2012). Design and Application of Communication Gateway of EPA and MODBUS on Electric Power System. *Energy Procedia*, 17, 286–292. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2012.02.096>
- Huitsing, P., Chandia, R., Papa, M., & Shenoj, S. (2008). Attack taxonomies for the Modbus protocols. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 1, 37–44. <https://doi.org/10.1016/J.IJCIP.2008.08.003>
- Ignatov, I. I., & Gade, P. N. (2019). *Data forming and visualization of BIM and sensor data in building management systems*. *DATA FORMATING AND VISUALIZATION OF BIM AND SENSOR DATA IN BUILDING MANAGEMENT SYSTEMS*. <https://www.researchgate.net/publication/337274994>

- Introduction.* (s.d.). Recuperato 2 marzo 2023, da https://standards.buildingsmart.org/IFC/DEV/IFC4_3/RC2/HTML/link/introduction.htm
- Jeon, K. E., She, J., Soonsawad, P., & Ng, P. C. (2018). BLE Beacons for Internet of Things Applications: Survey, Challenges, and Opportunities. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2), 811–828. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2788449>
- Jia, M., Komeily, A., Wang, Y., & Srinivasan, R. S. (2019). Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: A review of enabling technologies and applications. *Automation in Construction*, 101, 111–126. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2019.01.023>
- Karg, S. (s.d.). *The BACnet Device ID*.
- Kastner, W., Neugschwandtner, G., Soucek, S., & Newman, H. M. (2005). Communication systems for building automation and control. *Proceedings of the IEEE*, 93(6), 1178–1203. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.849726>
- Katuk, N., Ku-Mahamud, K. R., & Zakaria, N. H. (2019). *A review of the current trends and future directions of camera barcode reading*. <http://www.jatit.org/volumes/ninetyseven8.php>
- Kim, B. H., Cho, K. H., & Park, K. S. (2000). Towards LonWorks technology and its applications to automation. *Proceedings - KORUS 2000: 4th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology*, 2, 197–202. <https://doi.org/10.1109/KORUS.2000.866025>
- Kozlovska, M., Klosova, D., & Strukova, Z. (2021). Impact of industry 4.0 platform on the formation of construction 4.0 concept: A literature review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Numero 5). <https://doi.org/10.3390/su13052683>
- Laakso, M., & Kiviniemi, A. (2012). The IFC standard - A review of history, development, and standardization. In *Electronic Journal of Information Technology in Construction* (Vol. 17, pagg. 134–161). <http://www.itcon.org/2012/9>
- Lampadine intelligenti | Philips Hue IT.* (s.d.). Recuperato 14 giugno 2023, da <https://www.philips-hue.com/it-it/products/smart-light-bulbs>
- Malinowsky, B., & Kastner, W. (2010). Integrating process communication in building information models with IFC and LON. *IEEE International Workshop on Factory Communication Systems - Proceedings, WFCS*, 221–230. <https://doi.org/10.1109/WFCS.2010.5548630>
- Marco Di Felice, C., & Stivani Sessione, F. I. (s.d.). *Corso di Laurea in Informatica per il management STUDIO E VALUTAZIONE SPERIMENTALE DI TECNICHE DI RADIO FINGERPRINTING PER NAVIGAZIONE INDOOR CON DISPOSITIVI MOBILI ANDROID*.
- Marksteiner, S., Juan, V., Jiménez, E., Vallant, H., & Zeiner, H. (2017). An overview of wireless IoT protocol security in the smart home domain; An overview of wireless IoT protocol security in the smart home domain. *2017 Internet of Things Business Models, Users, and*

- Networks*. <https://doi.org/10.1109/CTTE.2017.8260940>
- Maskuriy, R., Selamat, A., Ali, K. N., Maresova, P., & Krejcar, O. (2019). Applied sciences Industry 4.0 for the Construction Industry — How Ready Is the Industry ? *Applied Sciences*, 9(14), 2819. <https://doi.org/10.3390/app9142819>
- Mays, C., Rice, M., Ramsey, B., Pecarina, J., & Mullins, B. (2017). Defending building automation systems using decoy networks. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 512, 297–317. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70395-4_15/COVER
- Mendoza-Silva, G. M., Torres-Sospedra, J., & Huerta, J. (2019). A meta-review of indoor positioning systems. *Sensors (Switzerland)*, 19(20). <https://doi.org/10.3390/S19204507>
- Mirarchi, C., Pavan, A., de Marco, F., Wang, X., & Song, Y. (2018). Supporting facility management processes through end-users' Integration and coordinated BIM-GIS technologies. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/IJGI7050191>
- Mutiara, G. A., Hapsari, G. I., Periyadi, & Pratondo, A. (2019). Estimote-based location awareness on mobile devices for visually impaired. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 97(1), 215–226.
- Newman, H. M. (2013). *BACnet Today and the Smart Grid About the Author*. www.bacnet.org,
- Noran, O., Romero, D., & Burchiu, S. (2020). Exploring the Path Towards Construction 4.0: Collaborative Networks and Enterprise Architecture Views. In *IFIP Advances in Information and Communication Technology* (Vol. 592). https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-57997-5_63
- Pang, D. F., Lu, S. L., & Zhu, Q. Y. (2014). Design of intelligent home control system based on KNX/EIB bus network. *Proceedings - 2014 International Conference on Wireless Communication and Sensor Network, WCSN 2014*, 330–333. <https://doi.org/10.1109/WCSN.2014.74>
- Part of the IFC hierarchy under IfcRoot | Download Scientific Diagram*. (s.d.). Recuperato 7 marzo 2023, da https://www.researchgate.net/figure/Part-of-the-IFC-hierarchy-under-IfcRoot_fig3_262318711
- Paterna, V. C., Augé, A. C., Aspas, J. P., & Bullones, M. A. P. (2017). A Bluetooth Low Energy Indoor Positioning System with Channel Diversity, Weighted Trilateration and Kalman Filtering. *Sensors 2017*, Vol. 17, Page 2927, 17(12), 2927. <https://doi.org/10.3390/S17122927>
- Peralta-Abarca, J. del C., Martínez-Bahena, B., & Enríquez-Urbano, J. (2020). Industria 4.0. *Inventio*, 16(39). <https://doi.org/10.30973/inventio/2020.16.39/4>
- Perrier, N., Bled, A., Bourgault, M., Cousin, N., Danjou, C., Pellerin, R., & Roland, T. (2020). Construction 4.0: A survey of research trends. In *Journal of Information Technology in*

Construction (Vol. 25). <https://doi.org/10.36680/J.ITCON.2020.024>

- Ploennigs, J., Ryssel, U., & Kabitzsch, K. (2010). Performance analysis of the EnOcean wireless sensor network protocol. *Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2010*. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2010.5641313>
- Pradeep, G., Chandra Shaker, P., & Prasad, S. V. S. (2019). Building management system. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(11). <https://doi.org/10.35940/ijitee.K2161.0981119>
- Pu, W. C., & Tsai, C. Y. (2021). Development of automatic digital control interface for addressing a lighting equipment system using high power load. *Sensors and Materials*, 33(6). <https://doi.org/10.18494/SAM.2021.3238>
- Ramirez, R., Huang, C. Y., Liao, C. A., Lin, P. T., Lin, H. W., & Liang, S. H. (2021). A practice of BLE RSSI measurement for indoor positioning. *Sensors*, 21(15). <https://doi.org/10.3390/s21155181>
- Ranieri, R. (2021). *Localizzazione indoor basata su tecnologia UWB*.
- Rashid, S. J., Alkababji, A. M., & Khidhir, A. M. (2021). Communication and Network Technologies of IoT in Smart Building: A Survey. *NTU JOURNAL OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY*, 1(1), 1–18. <https://www.mendeley.com/catalogue/fcc40840-357a-35fd-9807-3e824e2511ab/>
- Ray, P. P. (2018). A survey on Internet of Things architectures. In *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* (Vol. 30, Numero 3, pagg. 291–319). King Saud bin Abdulaziz University. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2016.10.003>
- Razzaq, M., & Abdullah, I. (2022). Accuracy enhancement in indoor positioning system based on visible light communication. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 10(3), 300–310. <https://doi.org/10.21533/PEN.V10I3.3030>
- Sha, S., & Kaur, H. (2014). Simulation Study of Zigbee and EnOcean Home Automation Standards. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 03(09), 11711–11719. <https://doi.org/10.15662/IJAREEIE.2014.0309004>
- Sivasankari, M. A., Sudarvizhi, M. S., & Sarala, L. (s.d.). A COMPARATIVE STUDY OF WIRELESS TECHNOLOGIES BASED ON HOME AUTOMATION BLUETOOTH LOW ENERGY. *International Journal of Computer Science and Information Technology Research*, 2, 255–259. Recuperato 23 marzo 2023, da www.researchpublish.com
- Song, W., Lee, H. M., Lee, S. H., Choi, M. H., & Hong, M. (2018). Implementation of android application for indoor positioning system with estimote ble beacons. *Journal of Internet Technology*, 19(3), 871–878. <https://doi.org/10.3966/160792642018051903022>

- Soucek, S., & Zucker, G. (2012). Current developments and challenges in building automation. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 129(4), 278–285. <https://doi.org/10.1007/S00502-012-0013-4/FIGURES/2>
- Swan, B. (2022). *The Language of BACnet-Objects, Properties and Services*.
- Table 1 — There are 25 BACnet object types. The BAS Remote uses five which are highlighted. (s.d.). Recuperato 6 giugno 2023, da <https://automatedbuildings.com/news/aug08/articles/cctrls1/080724032404cctrls.htm>
- The Bluetooth® Low Energy Primer | Bluetooth® Technology Website*. (s.d.). Recuperato 19 aprile 2023, da <https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/the-bluetooth-low-energy-primer/>
- van Kranenburg, R., & Bassi, A. (2012). IoT Challenges. *Communications in Mobile Computing 2012 1:1*, 1(1), 1–5. <https://doi.org/10.1186/2192-1121-1-9>
- Vieira, R., Carreira, P., Domingues, P., & Aguiar Costa, A. (s.d.). *Supporting building automation systems in BIM/IFC: reviewing the existing information gap*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2018-0294>
- Wen, X., & Wang, Y. (2018). Design of smart home environment monitoring system based on raspberry Pi. *Proceedings of the 30th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2018*. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2018.8407864>
- Yang, J., Poellabauer, C., Mitra, P., & Neubecker, C. (2020). Beyond beaconing: Emerging applications and challenges of BLE. *Ad Hoc Networks*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.102015>
- Yassein, M. B., Mardini, W., & Khalil, A. (2016). Smart homes automation using Z-wave protocol. *Proceedings - 2016 International Conference on Engineering and MIS, ICEMIS 2016*. <https://doi.org/10.1109/ICEMIS.2016.7745306>
- Zhuang, Y., Yang, J., Li, Y., Qi, L., & El-Sheimy, N. (2016). Smartphone-based indoor localization with bluetooth low energy beacons. *Sensors (Switzerland)*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/s16050596>
- ZigBee Specification*. (2008). Zigbee Alliance website. <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/11/docs-05-3474-21-0csg-zigbee-specification.pdf>

Sistemi di georeferenziazione indoor tramite tecnologia Bluetooth: possibili implementazioni BMS e BIM based.
Andreuzza Virginia

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 Oggetti BACnet standard. (Swan, 2022)	46
Tabella 2 Proprietà di un Oggetto Ingresso Analogico.(Swan, 2022)	48
Tabella 3 Proprietà di un Oggetto Dispositivo. (Swan, 2022).....	49
Tabella 4 Servizi di Evento e Allarme.(Swan, 2022)	51
Tabella 5. Servizi di Accesso. (Swan, 2022)	52
Tabella 6. Gruppi di funzionalità. (Swan, 2022)	53
Tabella7. Differenze tra Bluetooth Classic e Bluetooth Low Energy.(<i>Bluetooth Technology Overview Bluetooth® Technology Website</i> , s.d.)	73
Tabella 8. Esempio di codifica BACnet di un dispositivo domotico.(<i>Table 1 — There are 25 BACnet object types. The BAS Remote uses five which are highlighted.</i> , s.d.).....	104
Tabella 9 Lista ed enumerazione Object Type BACnet fino a 54.(<i>BACnet - 10.4.21 BACnetObjectTypeEnum</i> , s.d.).....	105
Tabella 10. Elenco Type_Mark associati ai corrispondenti dispositivi elettrici.	112
Tabella 11 Dispositivi domotici presenti nel modello Revit e i rispettivi Object Type e Instance Number	115
Tabella 12 Dispositivi domotici e corrispondenti QR code.....	116

INDICE ICONOGRAFICO

Figura 1.1 Il paradigma dell'IoT come convergenza delle tre visioni “orientata alle cose”, “orientata all’Internet” e “orientata alla semantica”. (Atzori et al., 2010).....	9
Figura 1.2 Componenti di un dispositivo IoT. (Jia et al., 2019).....	12
Figura 1.3 (a destra) Schema dell’architettura a tre livelli dell’IoT.(Jia et al., 2019).....	13
Figura 1.4 (a sinistra) I tre livelli dell’architettura dell’IoT. (del Sarto et al., 2022).	13
Figura 1.5 Domini applicativi dell’IoT. (Atzori et al., 2010).....	14
Figura 1.6 Logo buildingSMART. (<i>Home - buildingSMART Technical</i> , s.d.)	17
Figura 1.7 Schema dati IFC a partire da <i>ifcRoot</i> . (<i>Part of the IFC hierarchy under IfcRoot / Download Scientific Diagram</i> , s.d.)	18
Figura 1.8 Livelli concettuali dello schema dati IFC. (<i>Introduction</i> , s.d.).....	19
Figura 2.1 Dispositivo di controllo BAS. (Vieira et al., s.d.)	23
Figura 2.2 Illustrazione di uno stack hardware e software di automazione degli edifici. (Domingues et al., 2016)	24
Figura 2.3 Architettura a tre livelli di un BAS. (Vieira et al., s.d.).....	26
Figura 2.4 Funzionamento rete LonWorks. (Kastner et al., 2005).....	30
Figura 2.5 Un esempio di schema logico di un impianto KNX. (<i>Cos’è e come funziona KNX - inDomus.it</i> , s.d.).....	32
Figura 2.6 Architettura dello stack ZigBee. (<i>ZigBee Specification</i> , 2008).....	36
Figura 2.7 Un oggetto di ingresso analogico. (Swan, 2022).....	47
Figura 3.1 Metodo di trilaterazione (a) condizione ideale, 3 cerchi si intersecano in un punto, (b) e (c) condizione imperfetta, 3 cerchi non si intersecano in un punto. (Duong & Thi, 2021).	60
Figura 3.2 Localizzazione tramite AOA. (Marco Di Felice & Stivani Sessione, s.d.).....	61
Figura 3.3 Fingerprinting. (Mendoza-Silva et al., 2019).....	62
Figura 3.4 Canali BLE.(<i>Bluetooth Low Energy – Regulatory Aspects Document (RAD) / Bluetooth® Technology Website</i> , s.d.)	71
Figura 3.5 Differenze tra Bluetooth Classic e Bluetooth Low Energy. (<i>Bluetooth Technology Overview / Bluetooth® Technology Website</i> , s.d.).....	72
Figura 3.6 Stack BLE. (<i>The Bluetooth® Low Energy Primer / Bluetooth® Technology</i>	

Website, s.d.)	75
Figura 3.7 Formato dei pacchetti del livello di collegamento per i PHY LE non codificati. (<i>The Bluetooth® Low Energy Primer Bluetooth® Technology Website, s.d.</i>).....	76
Figura 3.8 (A) Codice a barre monodimensionale (lineare) e (B) codici a barre bidimensionali (a risposta rapida).(Agrawal & Hussain, 2021).....	97
Figura 3.9 Architettura generica per le applicazioni per la lettura di codici a barre.(Katuk et al., 2019)	101
Figura 3.10. Suddivisione dei bit della proprietà Object_Identifier in Object Type e Object Instance(Karg, s.d.).....	103
Figura 4.1 Schermata Revit, pianta della stanza popolata da dispositivi domotici.	109
Figura 4.2. Pannello di Controllo Desigo Control Point PXM50.E della Siemens. (<i>HIT, s.d.</i>)	110
Figura 4.3 Sensore NS Series Temperature and Humidity Network Zone and Discharge Air della Johnson.....	110
Figura 4.4 Interruttore a tre vie della Schneider Electric KNX push-button module, 1- gang, System M.....	111
Figura 4.5 Lampadine connesse della Philips, a sinistra la E27, a destra la E14.(<i>Lampadine intelligenti Philips Hue IT, s.d.</i>).....	111
Figura 4.6. Schermata Revit con abaco multi-categoria iniziale.....	113
Figura 4.7. Logo DiRootsOne.(<i>DiRootsOne - 8 productivity Revit Plugins by DiRoots, s.d.</i>)	113
Figura 4.8. Procedimento per esportare da Revit a Google un abaco multi-categoria.	114
Figura 4.9 Foglio Google Sheet ricavato dall'abaco multi-categoria di Revit tramite DiRootsOne.....	114
Figura 4.10 Procedimento per creare un'applicazione AppSheet a partire da Google Sheet.....	117
Figura 4.11 Schermata Google AppSheet delle impostazioni base per applicazione "BACnet ID"	117
Figura 4.12 Impostazioni per rendere scannerizzabile il valore Object_Identifier.....	118
Figura 4.13 Dispositivi domotici in pianta e corrispondenti etichette con Type_Mark	120
Figura 4.14 Schermata smartphone d'inizio dell'applicazione BACnet ID.....	120

Figura 4.15 (a) Selezione del dispositivo domotico, (b) Icona e voce per rilevare l'identificativo BACnet tramite fotocamera smartphone, (c) rilevazione dell'Object_Identifier e (d) dato salvato nel modo corretto all'interno dell'applicazione.	121
Figura 4.16 Foglio Google Sheet compilato in tutti i suoi campi	122
Figura 4.17 Object_Identifier del dispositivo DE6_0_1 compilato di Google Sheet in automatico dall'app.....	122
Figura 4.18 Processo di importazione del file Google Sheet in Revit tramite DiRootsOne	122
Figura 4.19 Abaco Revit compilato in modo corretto tramite importazione da Google Sheet con DiRootsOne.....	123

RINGRAZIAMENTI

Arrivata alla fine di questo percorso, vorrei ringraziare l'Università di Padova per avermi accolta quando ero matricola, fatta crescere e per avermi poi dato la possibilità di esplorare nuovi atenei. Ho iniziato che ero spaventata, ma avevo intuito che la facoltà di Ingegneria Edile-Architettura potesse essere un'esperienza differente. Ho reimparato ad amare lo studio, a godere appieno degli esami che preparavo, e, soprattutto, ad assecondare le mie curiosità che sempre mi permettono di imparare.

Grazie alla ETSAM di Madrid, il mio Erasmus lì è stata un'esperienza di formazione e di conferma che più alta è la sfida e più mi ci imbatto con entusiasmo. Grazie al professor Antonio di Proyecto Urbano che con delicatezza mi ha guidata lungo tutto il suo corso, anche portando pazienza e dandomi fiducia quando all'inizio non sapevo una parola di spagnolo. La sua materia mi ha fatto lavorare non poco ma mi è piaciuta più di tutte le altre, e, alla fine del mio Erasmus, ho scoperto che la preferenza non era solo da parte mia ma anche da parte sua per i miei disegni e per il modo di ragionare.

Grazie alla UPC, anche a Barcellona ho trovato un ateneo in cui sono stata costretta a studiare tanto, ma devo proprio alla UPC e al team di professori la scelta di questa tesi e la consapevolezza che nella vita mi piacerebbe più fare l'ingegnere che l'architetto. Grazie a tutti i professori che ho incontrato, ho saputo solo alla fine dei mesi trascorsi lì che le materie che avevo scelto non erano da studentessa Erasmus e che loro erano preoccupati che io non potessi reggerle. Grazie perché prima che io arrivassi avete avvisato quelli che sarebbero diventati i miei compagni di corso, e poi amici, in modo che mi potessero accogliere e integrare nel loro gruppo; insieme a loro ho potuto studiare e confrontarmi in quei mesi che si sono dimostrati effettivamente duri. È stata un'attenzione premurosa e discreta ma efficace, ora ricordo Barcellona e la UPC con affetto.

Da ultimo ma non per importanza, grazie al professor Zanchetta. Sono arrivata nel tuo studio a ottobre e ti ho chiesto una tesi che mi permettesse ancora una volta di esplorare nuovi orizzonti prima di tutto ingegneristici ma possibilmente anche paesaggistici. Durante questi mesi mi sono imbattuta in argomenti nuovi e ho approfondito materie di studio che ignoravo. Ti potrei ringraziare anche solo per questo, perché il tuo bagaglio culturale e la tua curiosità sono talmente grandi da avermi saputo far assaporare e apprezzare tematiche che per me all'inizio erano indecifrabili; ma, a dir la verità, quest'ultimo aspetto non è l'unica cosa che mi ha colpito: grazie per la capacità umana e per la voglia di stare con i tuoi studenti dimostrate con tutti noi tesisti. Le revisioni nel tuo studio sono sempre state un momento bello di condivisione del nostro sapere (più tuo che nostro) ma anche di umanità e serenità che passavano da un semplice "come stai?" sincero. Grazie perché per merito tuo e del nostro lavoro insieme ho potuto ritornare ad apprezzare Padova e le possibilità di studio che mi offre: ora devo a te questo tentennamento sulla scelta di rimanere qui o di prendere di nuovo il volo per una nuova città e per un'altra sfida.

