



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo



*Ministero dell'Università
e della Ricerca*



REACT EU

La borsa di dottorato è stata cofinanziata con risorse del
Programma Operativo Nazionale Ricerca e Innovazione 2014-2020, risorse FSE REACT-EU
Azione IV.4 “Dottorati e contratti di ricerca su tematiche dell’innovazione”
e Azione IV.5 “Dottorati su tematiche Green”

IoT e Digital Twin Applicati Agli Impianti Tecnici Di Edificio: Modelli Sperimentali Open Source

Facoltà di ingegneria civile e industriale
Dipartimento di ingegneria aeronautica, elettrica ed energetica
Dottorato di ricerca in “Engineering and Applied Science for Energy and Industry”

Alessandro Flamini

Supervisore
Luigi Martirano

A.A. 2024-2025

Sommario

1. INTRODUZIONE	4
2. STATO DELL'ARTE	6
2.1 IoT	6
2.1.1 Protocolli di comunicazione	7
2.1.2 Il monitoraggio energetico degli edifici	23
2.2.3 Building automation	34
2.2.4 Il risparmio energetico nella building automation: UNI EN ISO 52120	37
2.2.5 Domotica	43
2.2 Digital Twin	58
2.2.1 Modellazione in ambiente BIM	58
2.2.2 Digital Twin	65
3. SVILUPPI APPLICATIVI	68
3.1 Sistemi di monitoraggio	68
3.1.1 Valutazione delle performance di una sistema di moitoraggio: il metodo del Level Of Coverage (LOC)	68
3.1.2 Case study industriale: Daikin Applied Europe	74
3.1.3 Sviluppo di una piattaforma di monitoraggio per il Laboratorio LAMBDA	84
3.2 Realizzazioni di impianti domotici: confronto tra sistemi tradizionali e di nuova generazione	92
3.3 Applicazioni di Digital Twin	107
4. SVILUPPI SPERIMENTALI	123
4.1 Sistemi di monitoraggio	123
4.1.1 Monitoraggio distribuito: una piattaforma sperimentale	123
4.2 Digital Twin	132
4.2.1 BIMr2DT: integrazione diretta del BIM nel DT	132
4.2.2 Case Study: ADLAS - Micro-rete S.A.P.I.E.N.T.E. (ENEA)	141
4.2.3 Classificazione	155
5. CONCLUSIONI	167
REFERENCES	169

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni il settore dell'ingegneria impiantistica e delle costruzioni ha subito cambiamenti radicali lungo tutta la filiera, dalla progettazione alla realizzazione delle opere, inclusi anche gli aspetti della gestione degli impianti e degli edifici. I rapidi sviluppi tecnologici degli ultimi decenni nel campo dell'elettronica hanno portato alla nascita di elaboratori sempre più performanti in termini di capacità di calcolo, con dimensioni sempre più ridotte e costi sempre più accessibili e alla portata di diversi settori. Quello industriale è stato il primo a poter sfruttare i vantaggi economici derivanti dall'introduzione di nuove tecnologie nelle filiere, seguito poi da quello commerciale e dal terziario, arrivando in tempi più recenti a interessare anche il settore residenziale, da sempre molto più esigente in termini di economicità. Trainato dal settore elettronico anche quello informatico sta affrontando un'evoluzione rapida e costante con lo sviluppo di piattaforme on promise, servizi cloud, reti ad alta velocità e sistemi di elaborazione in grado di gestire enormi volumi di dati e di supportare applicazioni distribuite.

Questi avanzamenti hanno reso disponibili nuovi strumenti di supporto, così potenti che neanche la più vigorosa inerzia e resistenza dei professionisti di vecchia scuola è riuscita a frenare la loro introduzione nel processo ingegneristico. Digitalizzazione è diventata la parola centrale dei nuovi sistemi. La nascita dell'IoT, "Internet of Things", sta rivoluzionando la concezione dei sistemi tecnici, introducendo la possibilità di raccogliere e gestire in tempo reale un'enorme mole di dati e di interpretarla automaticamente trasformandoli in informazioni fruibili ai tecnici per una gestione dei sistemi che diventa sempre più consapevole e informata. La capacità di calcolo avanzata, raggiunta dai moderni calcolatori, consente in molti casi ai sistemi di gestirsi autonomamente tramite algoritmi di automazione e, ultimamente, di auto apprendere dall'esperienza con strumenti come l'intelligenza artificiale e il deep learning.

La nascita e la diffusione del BIM come processo di progettazione ha rappresentato un ulteriore passo verso la piena digitalizzazione del settore delle costruzioni e degli impianti, aumentando l'efficienza dell'intero processo. L'integrazione dei modelli tridimensionali e informativi, con i dati dinamici provenienti dal campo, ha trasformato quello che può essere visto come una fotografia della realtà in vere repliche digitali che insieme al mondo reale "vivono" e si evolvono, seguendolo come un'ombra o, di più, come una controparte immateriale, capace non solo di riflettere lo stato attuale del sistema fisico, ma anche di

anticiparne i comportamenti, prevederne le criticità e operare su esso per ottimizzarne il funzionamento.

All'interno di questo scenario, questa tesi si pone come obiettivo quello di analizzare come l'Internet of Things e il Digital Twin vengono introdotti nell'impiantistica moderna. Saranno approfondite le tecnologie abilitanti, i protocolli di comunicazione e le architetture di sistema più diffuse, seguendo un approccio applicativo e orientato alla pratica professionale, valutando criticamente la soluzione attualmente disponibili e confrontandole tra loro. Saranno descritte applicazioni pratiche di sistemi di monitoraggio, impianti domotici e Digital Twin sviluppate durante il percorso di dottorato, e verranno descritte soluzioni sperimentali proposte per superare le criticità riscontrate durante l'utilizzo di queste tecnologie.

2. STATO DELL'ARTE

2.1 IoT

Il termine IoT, Internet of Things, è stato coniato nel 1999 dall'ingegnere inglese Kevin Ashton [1], che lo definiva come l'insieme di "sensori e computer interconnessi in grado di raccogliere e scambiare dati senza l'intervento umano". Da quel momento il termine *Internet of Things* si è evoluto e diffuso notevolmente grazie agli sviluppi nei settori dell'informatica, delle telecomunicazioni e dell'elettronica, tanto che ad oggi è difficile trovare una definizione univoca e universalmente accettata.

Ad esempio, IEEE nel suo special report sull'Internet of Things di marzo 2014 [2] lo descrive genericamente come:

"A network of items—each embedded with sensors—which are connected to the Internet."

L'IETF (Internet Engineering Task Force) [3] invece lo descrive come:

"The basic idea is that IoT will connect objects around us (electronic, electrical, non electrical) to provide seamless communication and contextual services provided by them. Development of RFID tags, sensors, actuators, mobile phones make it possible to materialize IoT which interact and coOperate each other to make the service better and accessible anytime, from anywhere."

E ancora il NIST (National Institute of Standards and Technology) lo descrive come [4]:

"Cyber/physical systems (CPS) – sometimes referred to as the Internet of Things (IoT) – involves connecting smart devices and systems in diverse sectors like transportation, energy, manufacturing and healthcare in fundamentally new ways. Smart Cities/Communities are increasingly adopting CPS/IoT technologies to enhance the efficiency and sustainability of their operation and improve the quality of life."

Al di là della definizione ufficiale, con il termine IoT oggi si intende un sistema interconnesso di oggetti reali univocamente identificabili, in grado autonomamente di raccogliere, comunicare ed elaborare informazioni sul mondo reale ed eventualmente agire su di esso tramite attuatori.

Questo nuovo paradigma tecnologico sta rivoluzionando il settore impiantistico, diventando un elemento sempre più presente negli impianti tecnici ed elevandoli a sistemi intelligenti

[5]. L'IoT applicato all'ingegneria abilita infatti all'utilizzo di nuovi strumenti come il monitoraggio in tempo reale dei parametri di funzionamento dei sistemi, la remotizzazione dei controlli, la gestione a distanza e l'automazione dei processi, e permette inoltre di applicare nuove strategie di gestione come la manutenzione predittiva e l'integrazione nei processi di tecnologie legate ai Big Data, quali reti neurali, deep learning e intelligenza artificiale, come ulteriori strumenti di supporto per la gestione automatica e la predizione.

2.1.1 Protocolli di comunicazione

Qualsiasi tipo di comunicazione per funzionare ha bisogno di un set di regole fisse e condivise da tutti gli attori coinvolti nella comunicazione stessa, che vadano a definire in maniera univoca tutti gli aspetti dello scambio di informazioni, a partire dal mezzo fisico tramite il quale l'informazione viene trasmessa, fino ad arrivare allo specifico "linguaggio" adottato. In una comunicazione tra più persone, ad esempio, si decide innanzitutto se questa debba avvenire per via verbale o in forma scritta o ancora tramite gesti definendo quindi in primis il mezzo di trasmissione dell'informazione, e immediatamente dopo la lingua in cui comunicare. Immaginando una riunione in presenza, ogni partecipante si identifica, vengono utilizzate frasi o gesti per segnalare che si è in ascolto, si stabilisce un contatto visivo con l'interlocutore o lo si menziona se il messaggio è diretto ad una persona specifica, si stabilisce una modalità per prendere la parola, si inizia la riunione con una frase di apertura e la si conclude con una di chiusura (Es. "Benvenuti", "Arrivederci"). Tutte queste azioni rappresentano un set di regole condivise tra tutti i partecipanti alla conversazione e rappresentano un elemento essenziale affinché la comunicazione avvenga in modo efficace.

Nei sistemi informatici questo ruolo è ricoperto dai protocolli di comunicazione, organizzati su sette livelli definiti dal modello ISO-OSI [6] (International Standard Organization – Open System Interconnection):

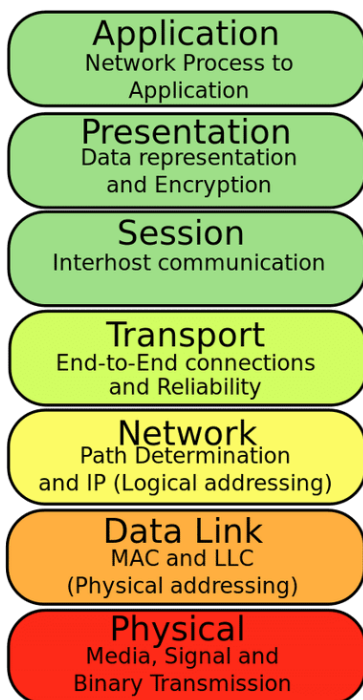


Figura 1 Stack ISO/OSI

1) **Livello fisico:** definisce le caratteristiche fisiche della comunicazione, a partire dal mezzo di trasmissione dell'informazione fino ad arrivare alla codifica del singolo bit (tipo di cavo di collegamento, livelli di tensione, connettori, frequenza del segnale radio, tipologia di antenne durata del segnale, numero di bit di un collegamento). Esempi di protocolli che risiedono in questo livello sono Bluetooth, RS-485, RS-232.

2) **Livello collegamento dati:** i protocolli appartenenti a questo livello si occupano di gestire la trasmissione dei dati attraverso il livello fisico. A questo livello vengono creati i pacchetti di dati (frammentazione dei dati) dotati di intestazione (header) e coda (tail), viene definito il feedback di ricezione dell'informazione ACK (Acknowledgment) e viene controllato che il flusso dei dati avvenga senza

sbilanciamenti nella velocità di trasmissione. Appartengono a questo livello i protocolli Ethernet e Wi-Fi.

3) **Livello di rete:** gestisce l'instradamento dei dati tra diversi dispositivi collegati tra loro. In questo livello vengono definiti gli indirizzi di rete e il percorso che il dato deve fare per arrivare a destinazione (routing), senza prendere in considerazione la sua integrità. Un esempio di protocollo a livello di rete è IP (Internet Protocol).

4) **Livello di trasporto:** in questo livello viene gestita la connessione tra mittente e destinatario (host) e viene garantito che il traffico dati avvenga senza congestioni. Appartengono a questo livello protocolli come TCP (Transmission Control Protocol) e UDP (User Datagram Protocol).

5) **Livello di sessione:** si occupa di stabilire, mantenere e chiudere la comunicazione tra due host. Esempi di protocolli che risiedono in questo livello sono NFS (Network File System) o SSH (Secure Shell).

6) **Livello di presentazione:** si occupa della conversione dei dati e di definire la sintassi dell'informazione, comprendendo servizio come la crittografia e la formattazione del dato. Nel primo caso troveremo protocolli come TLS (Transport Layer Security) e SSL (Secure Sockets Layer), nel secondo ad esempio ASCII per la codifica di testo.

7) Livello applicazione: è l'ultimo livello dello stack e si occupa di protocolli che lavorano direttamente con le applicazioni utilizzate dall'utente finale. Si occupa di determinare lo stato tra due applicazioni, stabilendo se i due sistemi sono in grado di comunicare e se sono disponibili le risorse per iniziare la comunicazione. In questo livello troviamo protocolli come HTTP (HyperText Transfer Protocol) per l'accesso alle pagine web, FTP (File Transfer Protocol) per il trasferimento dei file o SMTP o MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) per le comunicazioni IoT.

Nei sistemi IoT vengono coinvolti un gran numero di protocolli di comunicazione, sia con differenti ruoli all'interno dello stack IO/OSI sia per una forte specializzazione di alcuni di questi verso determinati settori impiantistici, ma anche semplicemente per differenti scelte di produttori e/o installatori sul protocollo ritenuto più performante. Raramente in un sistema IoT, anche limitando il campo a piccole reti come può essere quella rappresentata da un sistema domotico, si avrà a che fare con un singolo protocollo. È quindi necessario saper gestire e conoscere diversi protocolli di comunicazione. I principali protocolli coinvolti nei sistemi IoT applicati agli impianti tecnici sono esaminati a seguire.

TCP/IP

TCP/IP è il paradigma sul quale si base tutta la rete Internet. È il risultato della composizione del protocollo IP (Internet Protocol), che lavora sul livello di rete dello stack ISO/OSI, e il protocollo TCP relativo al livello di trasporto.

Il protocollo IP si occupa dell'indirizzamento in rete dei pacchetti di dati, aggiungendo al singolo pacchetto tutte le informazioni necessarie a raggiungere il destinatario, in un ulteriore pacchetto chiamato Header IP. Il concetto fondamentale che introduce il protocollo IP è legato all'indirizzamento fisico della singola macchina all'interno della rete: il famoso indirizzo IP [7]. Il protocollo definisce due tipi di indirizzi, in base alla versione, ossia IPv4 e IPv6, per semplicità espositiva si analizzerà solo il primo, in quanto quello per il momento di più diffuso utilizzo. L'indirizzo IPv4 è una stringa numerica composta da 4 valori separati dal punto, ognuno rappresentante un byte, quindi un numero compreso tra 0 e 255, che identifica univocamente la macchina all'interno della rete. Questo indirizzo può essere assegnato alla macchina dal router tramite DHCP o può essere fisso. Il pacchetto IP è composto da molteplici campi, come su può vedere in Figura 2:

- Versione: stabilisce se si tratta di un pacchetto IPv4 o IPv6
- Header length: lunghezza dell'header IP (non è costante)
- Tipo di servizio: comprende istruzioni su come trattare il dato

- Total length: lunghezza totale del pacchetto
- Identification, flags e Fragment Spacing: contengono le istruzioni per ricostruire il dato diviso in pacchetti
- TTL (Time To Live): un intero che viene decrementato ad ogni passaggio per evitare la circolazione infinita di un pacchetto (quando è 0 il pacchetto non viene più trasmesso)
- Protocol: indica il protocollo trasporto assegnato al pacchetto (6 per TCP)
- Header checksum: per il controllo di eventuali errori di trasmissione dell'header
- Source e Destination: gli indirizzi del mittente e del destinatario dell'informazione.

Bits	0–3	4–7	8–11	12–15	16–18	19–23	24–27	28–31
0	Version	Head Length	Type of Service		Total length (Packet)			
32	Identification				Flags	Fragment Spacing		
64	Lifespan (TTL)		Protocol		Header checksum			
96	Source Address							
128	Destination Address							
160	Options							

Figura 2 Pacchetto dati IP

IP è definito un protocollo non affidabile in quanto non garantisce che i pacchetti arrivino correttamente a destinazione, affidando questo ruolo a TCP, che garantisce inoltre che i dati trasmessi, se giungono a destinazione, lo facciano in ordine e una volta sola ("at most once").

TCP invia i dati in un flusso continuo di byte, ed ha quindi bisogno di un meccanismo di apertura e chiusura della connessione. L'apertura della comunicazione è basata su un processo di handshake a 3 vie, con il client che invia un pacchetto di sincronizzazione (SYN), il server che risponde (SYN-ACK) e la risposta finale del client (ACK) che conferma che la connessione è stabilita. Durante la trasmissione dei dati TCP garantisce che i pacchetti vengano ricevuti, tramite ulteriori passaggi di acknowledgment (ACK), lo facciano nell'ordine corretto, tramite un numero di sequenza, gestendo al contempo la congestione di rete, riducendo la velocità di trasmissione se rileva congestione sulla rete e ritrasmettendo immediatamente eventuali pacchetti persi [8].

La chiusura della connessione avviene tramite un processo Four-Way Handshake, con messaggio di chiusura (FIN) inviato dal client, al qual risponde il server (ACK), e vice versa al contrario. In Figura 3 si può apprezzare come un dato venga arricchito di pacchetti Header nella comunicazione basata sul paradigma TCP/IP.

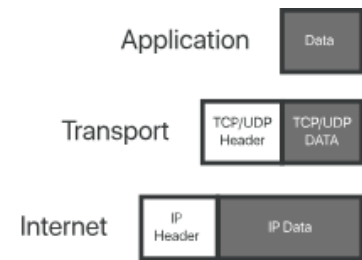


Figura 3 Costruzione del pacchetto con header

Wi-Fi ed Ethernet

I protocolli Wi-Fi (Wireless Fidelity) ed Ethernet operano sui primi due livelli dello stack, il fisico e il collegamento dati, risultando spesso come il substrato su cui si poggia TCP/IP. Per quanto riguarda il livello fisico si differenziano fortemente in quanto il primo utilizza come mezzo trasmissivo esclusivamente le radiofrequenze, mentre il secondo predilige un collegamento via cavo in rame o in fibra ottica. Per quanto riguarda il Wi-Fi, i dati vengono trasmessi tramite onde radio alle frequenze di 2.4, 5 e 6 GHz a seconda della versione dello standard (Wi-Fi 4, 5, 6, 6E o 7) utilizzando tecniche di modulazione come DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) e OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) e, sfruttando un mezzo di natura instabile, introduce tecniche di controllo e la possibilità di utilizzare più antenne tramite tecniche MIMO (Multiple Input Multiple Output)[9]. Ethernet invece, supporta diverse tipologie di connessione cablata principalmente rame, con doppini intrecciati schermati (STP- Shielded Twisted Pair) o meno (UTP - Unshielded Twisted Pair), o fibra ottica monomodale o multimodale, utilizzando differenti tecniche di codifica in base al mezzo trasmissivo e alla velocità della trasmissione [10].

A livello di collegamento dati entrambi i protocolli aggiungono al dato un pacchetto header simile, con delle differenze dovute principalmente alle differenti caratteristiche del mezzo di trasmissione utilizzato: nei sistemi Ethernet moderni, basati su switch, le trasmissioni avvengono su canali separati e stabili, eliminando la necessità di ACK e di gestione delle collisioni e prevedendo la presenza del solo indirizzo MAC mittente e destinatario, Wi-Fi invece può gestire più indirizzi MAC (per permettere la gestione di multipli Access Point) e ha bisogno di tecniche di evitamento delle collisioni, come CSMA/CA, e di acknowledgment (ACK) per la conferma della ricezione. Wi-Fi inoltre introduce il concetto di SSID (Service Set Identifier), che rappresenta il nome della rete, permettendo ai dispositivi client di individuare e connettersi alla rete, eventualmente tramite l'utilizzo di password di accesso gestite in sicurezza sfruttando i protocolli WPA2 e WPA3.

ModBUS

Modbus [11] è un protocollo di comunicazione seriale sviluppato nel 1979 ed è diventato uno standard de-facto nella comunicazione IoT industriale e più in generale per la maggior parte dei dispositivi installati nei quadri elettrici, risultando uno tra i protocolli di comunicazione più diffusi al mondo. I suoi principali punti di forza sono la versatilità e la completa libertà che offre ai produttori di dispositivi comunicanti, oltre alla sua semplicità e completa interoperabilità. Esiste in due versioni: RTU, con un'architettura master-slave, e TCP/IP con architettura client-server.

Modbus RTU opera con una connessione fisica basata su 4 conduttori, tipicamente sfruttando interfacce seriali RS-232 e RS-485, collocandosi sui livelli fisico, collegamento dati e applicazione dello stack ISO/OSI. Come suggerisce il nome, la comunicazione avviene tramite bus (Binary Unit System) ottimizzando così il numero di conduttori necessari, e può ospitare fino a 247 dispositivi sulla medesima rete, ognuno di essi identificato tramite un ID slave. La velocità di trasmissione (baud rate) può variare tra i 1200 e i 115220 bps, con o senza bit di stop e di parità. Il tipico pacchetto Modbus comprende un primo campo di silenzio, che indica l'inizio della comunicazione, un byte contenente lo slave ID, un codice funzione per specificare il tipo di operazione da effettuare (lettura scrittura o diagnostica), il payload e un campo CRC (Cyclic Redundancy Check) di verifica. Per accedere alla singola informazione, utilizzando il protocollo Modbus, è necessario conoscere la posizione del valore cercato all'interno della memoria del dispositivo. Questa posizione viene specificata attraverso i registri, spazi di memoria di 16bit (2 Byte) e i coil a singolo bit. Nella pratica si ha a che fare raramente con i coil, mentre i registri assumono un ruolo fondamentale. Ogni dispositivo Modbus viene solitamente venduto insieme a quella che viene chiamata "mappa dei registri" (Figura 4), una tabella contenente tutti i parametri di comunicazione del dispositivo, sia in lettura che in scrittura, associati al registro dove risiede, all'azione che accetta (W – scrittura, R – lettura, W/R), alla dimensione in termini di registri dello spazio allocato per quel parametro, al tipo di variabile e l'unità di misura. Questa caratteristica rende il protocollo Modbus da un lato molto versatile ed interoperabile, dall'altro molto laborioso e time-consuming dal punto di vista della messa in servizio. Per ovviare a questo problema molte case produttrici inseriscono le mappe dei registri dei loro

dispositivi nelle memorie dei propri dispositivi master, in modo tale da facilitare l'accoppiamento.

Indirizzo	Registro	Azione (L/S/SC)	Dimensioni	Tipo	Unità	Descrizione
Corrente						
0x0BB7	3000	R	2	Float32	A	I1: corrente fase 1
0x0BB9	3002	R	2	Float32	A	I2: corrente fase 2
0x0BBB	3004	R	2	Float32	A	I3: corrente fase 3
0x0BC1	3010	R	2	Float32	A	Media corrente
Tensione						
0x0BCB	3020	R	2	Float32	V	Tensione L1-L2
0x0BCD	3022	R	2	Float32	V	Tensione L2- L3
0x0BCF	3024	R	2	Float32	V	Tensione L3- L1
0x0BD1	3026	R	2	Float32	V	Media tensione L-L
0x0BD3	3028	R	2	Float32	V	Tensione L1-N
0x0BD5	3030	R	2	Float32	V	Tensione L2-N
0x0BD7	3032	R	2	Float32	V	Tensione L3-N
0x0BDB	3036	R	2	Float32	V	Media tensione L-N
Potenza						
0x0BED	3054	R	2	Float32	kW	Potenza attiva fase 1
0x0BEF	3056	R	2	Float32	kW	Potenza attiva fase 2
0x0BF1	3058	R	2	Float32	kW	Potenza attiva fase 3
0x0BF3	3060	R	2	Float32	kW	Potenza attiva totale
0x0BFB	3068	R	2	Float32	kVAR	Potenza reattiva totale NOTA: Non applicabile a iEM3150/iEM3250/iEM3350

Figura 4 Esempio mappa dei registri ModBus

Nella versione TCP/IP, la struttura del messaggio Modbus rimane la medesima, ma viene sfruttata la struttura del TCP/IP per operare sui livelli fisico, collegamento dati, rete e trasporto. L'indirizzo IP va a sostituire l'ID Modbus, e il controllo CRC viene abbandonato e affidato al protocollo TCP. Il principale punto debole di questa versione è quello legato alla sicurezza: poiché questo protocollo nasce nella sua versione seriale, non è stato pensato alcun meccanismo di sicurezza, il che rende necessario proteggere la rete Modbus TCP/IP con VPN, reti dedicati, firewall o segmentazione della rete LAN in sottoreti virtuali (VLAN).

È pratica comune utilizzare reti Modbus RTU per dispositivi situati in spazi ravvicinati, e collegarle insieme tramite dei gateway RTU-TCP/IP.

DALI

DALI (Digital Addressable Lighting Interface) è un protocollo standardizzato per il controllo specifico degli impianti di illuminazione. Data la sua semplicità, derivante dalla sua applicazione specifica al campo dell'illuminazione, viene spesso impiegato come sottosistema nei sistemi BMS (Building Management System), sfruttando gateway per interfacciarsi con il resto dell'impianto. I dispositivi utilizzabili in DALI sono limitati per tipologia: oltre al controller (master), alle lampade native DALI e a dispositivi di controllo di lampade tradizionali (driver e ballast DALI), possono essere utilizzati dispositivi di input strettamente correlati ai sistemi di illuminazione come pulsanti e interruttori, dispositivi di comando dimmer, e sensori di presenza, movimento e luminosità [12].

Il protocollo si colloca nei livelli fisico, collegamento dati e applicazione, senza necessitare di ulteriori specifiche per gli altri livelli di comunicazione. Utilizza come mezzo di trasporto dell'informazione un collegamento a due fili twistati non schermati (doppino) con tensione nominale di 16V e cablaggio libero (ad eccezione della configurazione ad anello) e velocità di trasmissione di 1200 bps. Il messaggio trasmesso dal protocollo è un pacchetto a 16 bit contenente l'indirizzo del destinatario (nei primi 8 bit) e il payload (ultimi 8 bit). L'indirizzamento dei dispositivi è rappresentato da un numero progressivo da 0 a 63, con un massimo quindi di 64 dispositivi, eventualmente raggruppabili in massimo 16 gruppi (da 0 a 15).

KNX

KNX è un protocollo di comunicazione standardizzato (ISO/IEC 14543) [13] per la building automation, sviluppato per fornire una piattaforma interoperabile tra dispositivi di produttori diversi. Si distingue per la sua architettura decentralizzata e la capacità di integrare molteplici funzioni come illuminazione, climatizzazione, oscuranti, antintrusione, e scenari complessi all'interno di edifici residenziali, commerciali e industriali. È un'evoluzione dei protocolli EIB, BatiBUS e EHS, unificati in un unico standard.

KNX può operare su diversi media fisici: la doppia coppia twistata (KNX TP – Twisted Pair) è il mezzo più diffuso e consolidato, ma esistono anche implementazioni su KNX IP (Ethernet), KNX RF (radiofrequenza) e KNX PL (power line). Il cablaggio in TP utilizza due fili non polarizzati, con una velocità di trasmissione di 9600 bps e alimentazione integrata a 29V DC. La topologia consigliata è una combinazione di linee, aree e segmenti, con supporto per configurazioni ad albero o lineari, ma non ad anello. Ogni linea può contenere fino a 64 dispositivi (espandibili a 256 con ripetitori), e ogni area può contenere fino a 16 linee, con un massimo di 16 aree.

Un aspetto fondamentale di KNX è la presenza di due schemi di indirizzamento:

- Indirizzo fisico, univoco per ogni dispositivo, nella forma A.L.D (es. 1.1.5), dove A rappresenta l'area, L la linea e D il dispositivo. Serve a identificare il dispositivo nella fase di programmazione.
- Indirizzo di gruppo, utilizzato per la comunicazione runtime, segue una logica multicast e consente a più dispositivi di ricevere lo stesso comando. È strutturato in forma gerarchica (es. 1/1/10) per facilitare l'organizzazione tematica e funzionale.

La programmazione dei dispositivi KNX avviene tramite il software ETS (Engineering Tool Software), che consente di configurare la rete, assegnare gli indirizzi, definire le associazioni

tra oggetti di comunicazione (data point) e gruppi, nonché caricare la configurazione nella memoria dei dispositivi. Ogni dispositivo dispone di un set predefinito di oggetti di comunicazione, che rappresentano ingressi, uscite, parametri e comandi, e possono essere collegati a uno o più indirizzi di gruppo. La comunicazione tra dispositivi avviene esclusivamente attraverso questi oggetti, seguendo una logica orientata ai dati piuttosto che ai comandi diretti.

KNX si colloca ai livelli fisico, collegamento dati, rete e applicazione del modello ISO/OSI. I livelli trasporto e sessione non sono utilizzati, in quanto le trasmissioni sono brevi e stateless. La comunicazione avviene in modalità peer-to-peer con supporto multicast, broadcast e unicast, garantendo elevata reattività e flessibilità funzionale. I pacchetti KNX includono informazioni di routing, tipo di servizio (GroupValueWrite, Read, Response), priorità, lunghezza del payload e checksum.

Grazie alla sua standardizzazione e stabilità, KNX rappresenta una delle soluzioni più mature e affidabili per la domotica e la building automation professionale, con una vasta gamma di dispositivi certificati da centinaia di produttori. La sua struttura decentralizzata garantisce la resilienza della rete, mentre il software ETS offre un controllo completo sulla configurazione e il funzionamento dell'impianto.

BACNET

BACnet (Building Automation and Control Network) è un protocollo di comunicazione standardizzato, sviluppato nel 1987 da ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) per l'automazione e il controllo degli edifici e permette l'integrazione di sottosistemi come HVAC, illuminazione, sicurezza e gestione energetica all'interno di un'unica rete di automazione, il che lo rende uno dei protocolli più utilizzati in ambito Building Automation [14].

Diversamente da protocolli come Modbus, che si basa su registri e coil, BACnet adotta un modello a oggetti e servizi: ogni dispositivo BACnet è rappresentato come un insieme di oggetti che contengono proprietà accessibili tramite servizi di comunicazione. Gli oggetti principali sono: Analog Input (AI), Analog Output (AO), Analog Value (AV) (per variabili analogiche come temperatura, umidità o consumo energetico), Binary Input (BI), Binary Output (BO), Binary Value (BV), device (per identificare un dispositivo nella rete), schedule e trend log.

Dal punto di vista della comunicazione, BACnet si distingue per la sua flessibilità, potendo operare su più livelli dello stack ISO/OSI e supportare diversi mezzi trasmissivi: cavo seriale RS-485 per il BACnet MS/TP (Master-Slave/Token Passing), gestendo il bus con un sistema basato su token passing, su reti Wi-Fi ed Ethernet, per la versione BACnet/IP sfruttando il protocollo UDP e per la versione BACnet over Ethernet per reti esclusivamente locali, o in radiofrequenza con BACnet over Zigbee.

L'indirizzamento in BACnet è più avanzato rispetto a protocolli come Modbus o DALI: non si basa su ID numerici fissi, ma utilizza un sistema di discovery automatico in cui i dispositivi possono annunciarsi sulla rete con un messaggio I-Am e interrogare gli altri dispositivi con un messaggio Who-Is. Questo consente una maggiore scalabilità e riduce la necessità di configurazioni manuali.

MQTT

MQTT (Message Queue Telemetry Transport) è un protocollo di comunicazione di tipo publish/subscribe che opera sui livelli di trasporto e applicazione, sfruttando tipicamente TCP/IP per completare lo stack. È molto leggero, semplice e progettato per essere facilmente implementabile, ideale per comunicazioni Machine to Machine (M2M) e per l'Internet of Things (IoT) [15].

È basato su un'architettura client/Broker. Il Broker è il cuore del sistema; ogni client stabilisce una connessione solo ed esclusivamente con esso e tramite esso transitano tutti i messaggi. Ha il compito di:

- Identificare i client
- Accettare le connessioni
- Determinare le sottoscrizioni (subscribes)
- Ricevere e filtrare i messaggi
- Reindirizzare i messaggi verso i client destinatari

I client invece sono gli elementi che effettivamente comunicano e possono essere interpretare il ruolo sia di publisher sia di subscriber sia entrambi simultaneamente.

A livello logico il protocollo è strutturato in messaggi e topic: ogni messaggio, inteso come payload del pacchetto che effettivamente transita, viene pubblicato da un client all'interno di un topic specifico e sarà recapitato dal broker solo ai client che hanno sottoscritto quel determinato topic.

Il topic è identificato da una stringa di testo in formato UTF-8 e può essere strutturato in più livelli, utilizzando il carattere "/" (slash) come carattere separatore di livello (e.g.

casa/cucina/temperatura). Possono essere utilizzati caratteri speciali (wildcards) per riferirsi a più livelli contemporaneamente:

- “+”: single-level wildcard. “casa+/temperatura” identifica tutti i topic del tipo casa/<qualcosa>/temperatura
- “#”: multi-level wildcard. Può essere usato solo alla fine del percorso e identifica tutti i topic con lo stesso percorso fino al livello della wildcard. Ad esempio “casa/cucina/#” si riferisce a tutti i topic che condividono i primi due livelli.

Per quanto riguarda invece il payload, essendo un protocollo data-agnostic viene accettato qualsiasi tipo di dato (stringhe di testo, valori numerici, booleani, immagini ecc...) trasmesso sotto forma di byte, permettendo anche l'invio di messaggi criptati.

Ai messaggi viene anche associato un livello di qualità del servizio, “Quality of Service” (QoS) che definisce tre livelli di garanzia dell'avvenuta comunicazione:

- 0: il messaggio viene trasmesso al massimo una volta;
- 1: il messaggio viene trasmesso almeno una volta;
- 2: il messaggio viene trasmesso esattamente una volta;

All'atto della connessione il client invierà al Broker un messaggio di CONNECT (*Figura 5*) contenente le seguenti informazioni:

- ClientID: una stringa univoca identificativa del singolo client;
- Clean Session: stabilisce se la sessione è persistente (CleanSession=false). In tal caso il broker manterrà in memoria le sottoscrizioni e i messaggi non recapitati al client in seguito ad una disconnessione, in attesa di una futura connessione;

MQTT-Packet:	
CONNECT	
contains:	Example
clientId	"client-1"
cleanSession	true
username (optional)	"hans"
password (optional)	"letmein"
lastWillTopic (optional)	"/hans/will"
lastWillQos (optional)	2
lastWillMessage (optional)	"unexpected exit"
lastWillRetain (optional)	false
keepAlive	60

Figura 5 pacchetto connect MQTT

- Username/Password: nome utente e password per l'autenticazione, nel caso in cui sia stata scelta questa opzione in fase di configurazione del broker;
- LastWillTopic/QoS/Message/Retain: campi relative al LastWill message, ossia un messaggio che il broker conserverà e invierà automaticamente in caso di disconnessione improvvisa del client;
- KeepAlive: secondi dopo i quali la connessione viene chiusa se non avviene alcuna comunicazione (se il client non necessita di inviare messaggi ma si vuole mantenere la connessione verrà inviato un semplice messaggio PING Request);

Il broker risponderà con un messaggio di feedback CONNACK (connect acknowledge) contenente solo due informazioni:

- sessionPresent: se vengono trovate informazioni riguardo una precedente connessione persistente;
- returnCode: indica se la connessione è avvenuta con successo (0) o no (1, 2, 3, 4 o 5 in base al problema riscontrato);

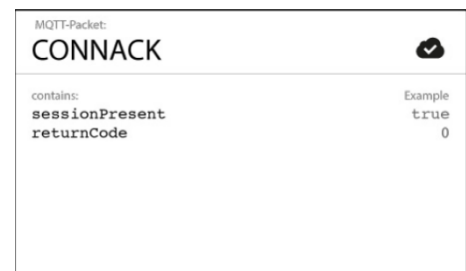


Figura 6 pacchetto connack MQTT

Effettuata con successo la connessione il client può sottoscrivere uno o più topic inviando al broker un messaggio di SUBSCRIBE contenente un codice identificativo del messaggio (Packet ID) e una lista di topic (list of subscription), ricevendo in risposta un messaggio di feedback SUBACK; allo stesso modo può pubblicare un messaggio in uno specifico topic inviando un pacchetto PUBLISH al broker comunicando:

- PacketID;
- Topic Name;
- QoS;
- Retain Flag: se impostata su “true” il messaggio verrà salvato dal broker e un client che sottoscriverà il topic indicato dopo la pubblicazione lo riceverà ugualmente (riceverà l’ultimo messaggio pubblicato nel topic e con Retain Flag attivata);
- Payload: rappresenta il contenuto vero e proprio del messaggio;
- dupFlag: utilizzato per la gestione del QoS;



Figura 7 pacchetto publish MQTT

Il client riceverà un pacchetto di feedback PUBACK solo nel caso sia richiesto un QoS maggiore di zero.

Zigbee

Zigbee è un protocollo di comunicazione wireless nato per rispondere all’esigenza di una comunicazione intermittente a corto raggio caratterizzata da un ridotto consumo di energia. Trova infatti applicazione in sistemi IoT per la domotica e la building automation in generale, automazione industriale e sistemi di monitoraggio. Opera nei livelli fisico e collegamento dati dello stack ISO/OSI attraverso lo standard IEEE 802.15.4 [16], utilizzando tipicamente la banda di frequenza a 2,4GHz, ma può utilizzare anche la banda a 868 MHz in Europa o 915 MHz negli Stati Uniti, con velocità di trasmissione fino a 250 kbps. La peculiarità di questo protocollo si trova però a livello di rete, permettendo la realizzazione di reti mesh multi-hop,

oltre alle classiche configurazioni a stella e albero. All'interno di una rete Zigbee è sempre presente un unico dispositivo coordinatore (solitamente un gateway verso protocolli seriali o TCP/IP) che gestisce la comunicazione e l'instradamento dei pacchetti, uno o più dispositivi router, solitamente dispositivi collegati ad un'alimentazione diretta, che oltre ad assolvere alla funzione per cui vengono installati (ad esempio uno switch luci o un termostato smart) consentono di allargare la copertura di rete essendo in grado di ricevere e rilanciare pacchetti ricevuti da altri dispositivi, e infine gli End Devices, dispositivi solitamente alimentati a batterie, in grado di inviare e ricevere pacchetti ma non di inoltrarli.

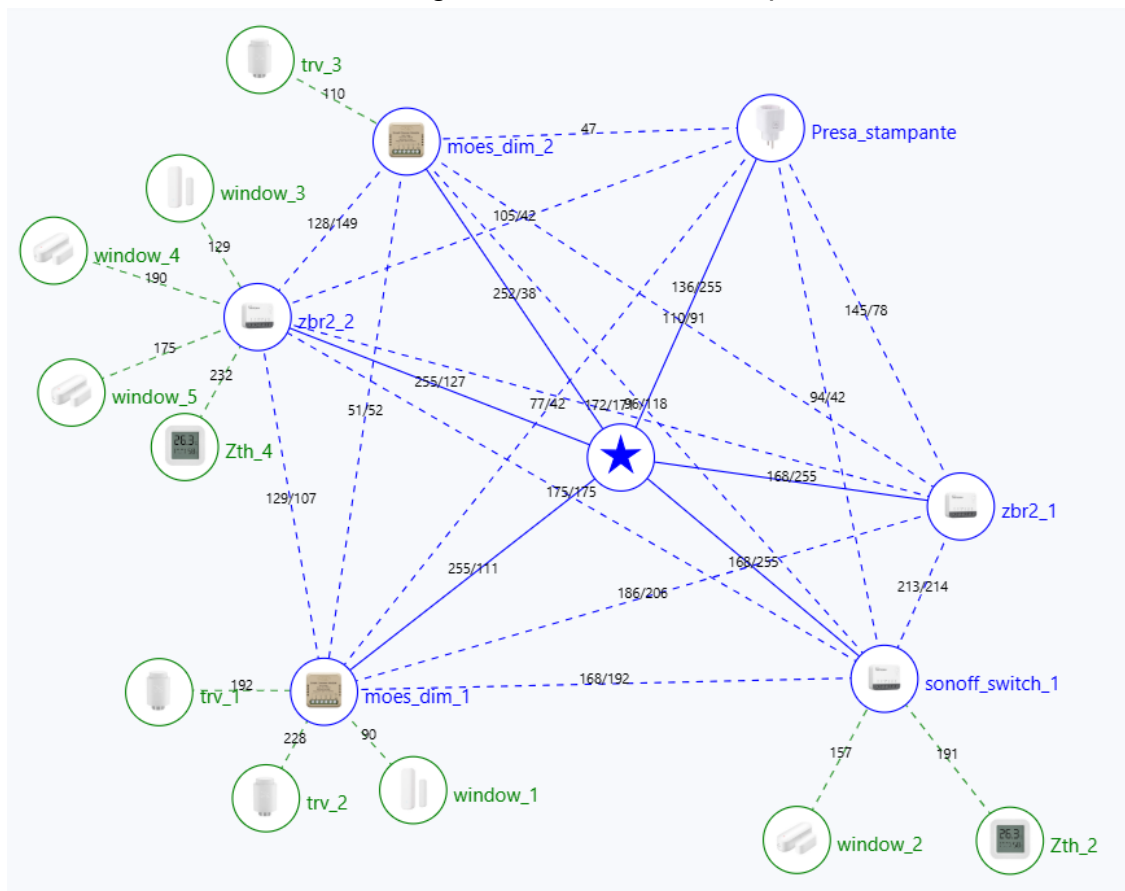


Figura 8 Architettura di rete mesh Zigbee

In Figura 8 si può apprezzare un esempio di architettura di rete mesh Zigbee, con un coordinatore centrale rappresentato da una stella blu, 6 dispositivi router (due dimmer, tre switch luce e una presa smart), collegati al coordinatore tramite una linea blu continua e tra loro con linee tratteggiate, in verde infine i dispositivi finali, collegati al router con qualità del segnale migliore tramite una linea tratteggiata verde.

L'ultimo livello ISO/OSI su cui il protocollo opera è quello applicativo, dove organizza lo scambio di informazioni introducendo cluster e Application Profiles; i primi definiscono una o più funzioni che il dispositivo può assolvere mentre i secondi definiscono le sue specifiche,

i cluster disponibili e come implementarli. I cluster possono essere generici, come ad esempio:

- On/Off Cluster
- Binary Input Cluster
- Analog Input Cluster
- Binary Output Cluster
- Multistate Output Cluster

o più specifici, per applicazioni molto comuni, come ad esempio:

- Window Covering Cluster
- Temperature Measurement Cluster
- Humidity Measurement Cluster
- Occupancy Sensing Cluster

I profili di applicazione possono essere pubblici o proprietari (sviluppati dal singolo produttore e non sempre interoperabili al 100%). I profili pubblici più comuni sono:

- Zigbee Home Automation (ZHA), il profilo più comune per applicazioni domotiche. Supporta luci, prese, sensori, termostati, serrature, interruttori, tapparelle, e dispositivi HVAC.
- Zigbee Light Link (ZLL), profilo pensato per il controllo dell'illuminazione, tipicamente usato in lampadine smart. Offre funzionalità di pairing semplificato.
- Zigbee Building Automation (ZBA), pensato per edifici commerciali e industriali, include dispositivi per HVAC, controllo accessi, illuminazione, e sicurezza.
- Zigbee Smart Energy (ZSE), utilizzato per il monitoraggio dei consumi e il controllo energetico nelle smart grid. Include contatori, inverter, termostati, e dispositivi demand-response.

Dalla versione Zigbee3.0, per garantire una maggiore interoperabilità, sono stati unificati tutti i profili in un unico profilo denominato proprio Zigbee 3.0.

All'atto dell'integrazione di un novo dispositivo in una rete zigbee, questo viene impostato in modalità "pairing" e il coordinatore in modalità "join", in modo tale che il dispositivo possa farsi riconoscere, comunicando application profile e cluster al coordinatore tramite un pacchetto di gestione. Le comunicazioni successive avverranno invece tramite pacchetti di dati o di richieste, gestiti in base ai cluster comunicati nella fase iniziale.

Bluetooth

Bluetooth è un protocollo wireless pensato per la comunicazione su brevi distanze (tipicamente dell'ordine dei 10m e fino a 100 metri), oggi uno degli standard più diffusi per la comunicazione tra dispositivi mobile, smartphone e computer. Nella sua versione originale consente la creazione di reti contenenti al massimo 7 dispositivi, le piconetwork, basate su una struttura master-slave con master variabile (tutti i dispositivi possono avere il ruolo di master, ma non contemporaneamente). Le piconet possono a loro volta essere collegate insieme in scatternet, dove ogni dispositivo può essere master di una piconet e slave di una scatternet [17].

All'interno dello stack ISO/OSI copre il livello fisico, definendo l'utilizzo della banda di frequenza a 2,4GHz con possibilità di cambio rapido della frequenza su 79 canali da 1MHz, si appoggia al protocollo Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP) per il livello di collegamento dati, emula una connessione seriale per livello di trasporto tramite il protocollo Bluetooth RFCOMM (Serial Cable Emulation Protocol) e infine, a livello applicativo, definisce una serie di profili di comunicazione specifici per diverse applicazioni, come Hands-Free Profile (HFP) per dispositivi audio, Human Interface Device (HID) per dispositivi di input (mouse, tastiere ecc) e Serial Port Profile (SPP) per emulare una connessione seriale.

Il tipico pacchetto dati contiene un preambolo iniziale di sincronizzazione, un header contenente gli indirizzi mittente e destinatario (si tratta di indirizzi MAC), tipologia e lunghezza del dato, il payload, e campi di verifica CRC e potenza di trasmissione (classe 1 per distanze fino a 100m, classe 2 fino a 10m, classe 3 fino a 1m).

Bluetooth implementa anche meccanismi di sicurezza basati su meccanismi di autenticazione e di crittografia per garantire una comunicazione sicura e non intercettabile.

Dal 2010 è disponibile anche la versione BLE (Bluetooth Low Energy) pensata per applicazioni IoT, che riduce fortemente i consumi energetici legati alla comunicazione e di conseguenza la velocità di trasmissione e le informazioni trasmesse nei pacchetti, andando incontro così alle esigenze del settore, dove il traffico dati risulta ridotto e le problematiche legate alla durata delle batterie invece assumono un ruolo importante.

L'ultima frontiera del protocollo è infine rappresentata dalla versione Mesh, introdotto nel 2017 nell'ecosistema BLE, che consente ai dispositivi di assumere anche un ruolo di bridge, ritrasmettendo i segnali ricevuti ai dispositivi limitrofi. In questo modo è possibile realizzare

reti scalabili che coprono aree molto estese (ben al di sopra dei limiti imposti dalla trasmissione in radiofrequenza. Il pacchetto dati rimane essenzialmente lo stesso, mentre cambia la modalità di indirizzamento che da peer-to-peer diventa di gruppo. All'interno della rete mesh i dispositivi possono comportarsi da nodi di sorgente (Source Nodes) inviando informazioni, nodi di destinatione (Destination Nodes) che le ricevono, o Nodi di relay (Relay Nodes), intermedi nel percorso di comunicazione con il compito di ritrasmettere l'informazione finché non raggiunge la destinazione. Quest'ultima implementazione del protocollo lo rende molto interessante per applicazione in ambito Building automation, e lo candida ad essere uno dei protagonisti del futuro dell'IoT.

Matter

Matter è l'ultima novità in termini di protocolli legati alla building automation e con molta probabilità dominerà il settore della domotica nei prossimi anni. Nasce infatti dalla collaborazione tra le maggiori case produttrici di dispositivi IoT e di elettrodomestici intelligenti, con l'obiettivo di uniformare e standardizzare la comunicazione in ambienti civili, puntando a una completa interoperabilità, elevata sicurezza e semplicità di utilizzo.

Opera sui livelli di sessione, presentazione e applicazione, implementando servizi di discovery, sicurezza tramite crittografia, controllo e aggiornamento dei dispositivi e automazione. Per gli altri livelli dello stack ISO/OSI si affida ai protocolli Wi-Fi, Thread e ethernet per il livello fisico e collegamento dati, IPv6 per il livello di rete e UDP per il trasporto. Matter introduce una struttura logica basata su una gerarchia molto chiara: ogni dispositivo ingloba al suo interno una o più istanze, chiamate nodi, che a loro volta contengono al loro interno uno o più Endpoint, ossia la specifica funzione del dispositivo stesso. Ogni endpoint è composto da uno o più cluster: collezioni di attributi e comandi che caratterizzano la specifica funzione. Ad esempio, il cluster On/Off gestisce l'accensione e lo spegnimento, mentre il cluster Temperature Measurement fornisce valori di temperatura [18].

Una rete Matter viene chiamata Fabric e i dispositivi al suo interno possono assumere diversi ruoli:

- **Controller:** Un nodo che può controllare altri nodi, come un'app su smartphone o un hub domestico.
- **Controlee:** Un nodo che può essere controllato da altri nodi, come una lampadina smart.
- **Commissioner:** Responsabile dell'integrazione di nuovi dispositivi nella rete Matter.

- **Administrator:** Che gestisce la sicurezza e i privilegi dei dispositivi all'interno di una rete Matter.

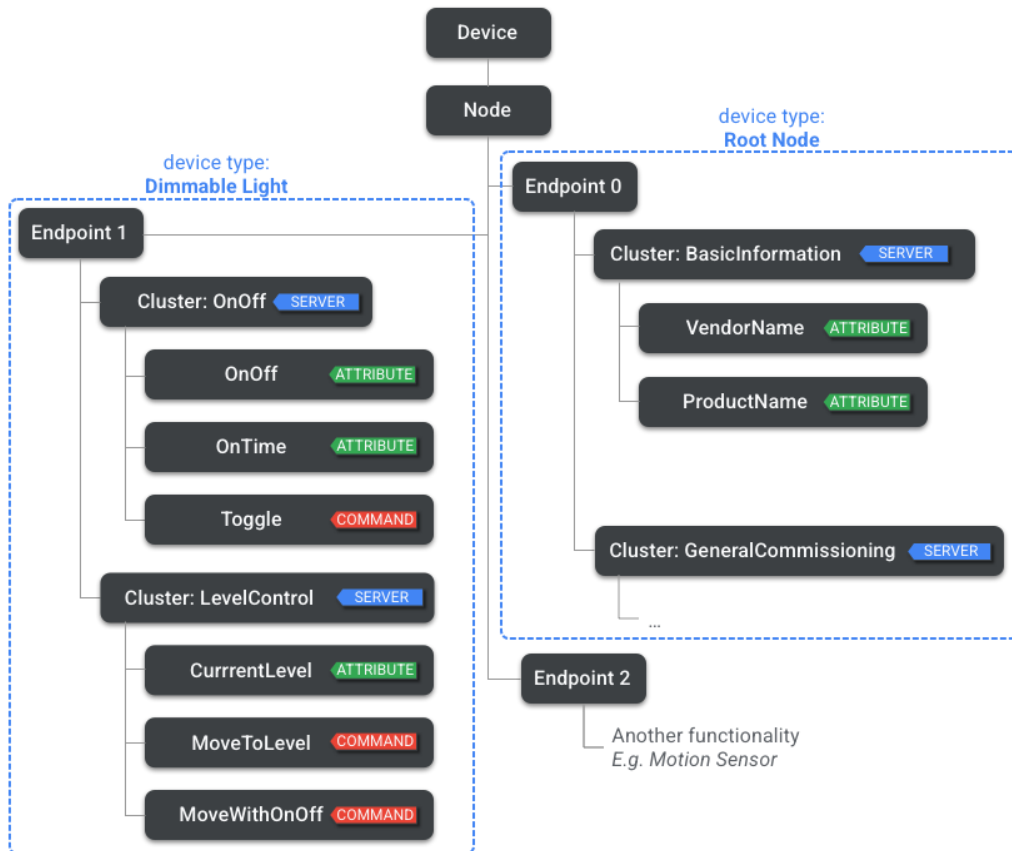


Figura 9 modello di interazione nella gerarchia Matter

Matter è compatibile anche con reti mesh tramite Thread, e può coesistere con dispositivi Wi-Fi ed Ethernet sulla stessa infrastruttura IP. Il protocollo supporta aggiornamenti OTA (Over-The-Air), group messaging, e consente l'integrazione con assistenti vocali come Alexa, Google Assistant e Siri.

La sicurezza è un elemento centrale: ogni dispositivo Matter è autenticato al momento del pairing mediante certificati e crittografia a chiave pubblica, con comunicazione cifrata end-to-end tramite TLS e DTLS. L'integrazione di un nuovo dispositivo nella rete avviene mediante onboarding sicuro, tramite QR code, NFC o numeri di setup. Un controller Matter (smartphone, hub o gateway) gestisce il processo di associazione, autentica il dispositivo e lo configura sulla rete IP.

2.1.2 Il monitoraggio energetico degli edifici

Tra i vari settori di applicabilità dell'Internet of Things, dal punto di vista ingegneristico, spicca per importanza quello dei sistemi di gestione di edifici e infrastrutture e più nello specifico i sistemi di monitoraggio. La centralità dei sistemi di monitoraggio in ottica

gestionale nasce dalla semplice constatazione che non si può gestire e ottimizzare ciò che non si conosce. L'utilizzo di questi sistemi, in un periodo di crisi economica, energetica e ambientale, è spesso associato alle questioni energetiche, trovandosi spesso di fronte all'esigenza di ridurre i consumi mantenendo gli stessi livelli prestazionali (che sia in termini di confort per quanto riguarda il settore civile, o in termini di produzione per quello industriale), puntando a livelli di efficienza sempre più elevati [19].

Tali obiettivi possono essere perseguiti su base volontaria, seguendo i suggerimenti contenuti nella norma ISO 50001 [20], o come obblighi di legge nei casi coperti dal decreto legislativo 102/2014 [21].

Prima di entrare nel dettaglio è necessario introdurre alcune terminologie definite dalle norme tecniche:

- **BMS** (Building Management system) e **BEMS** (Building Energy Management system) - Sono due terminologie introdotte dalla norma UNI EN ISO 52120 [22]. Per BMS si intende un sistema di gestione e controllo degli impianti tecnici degli edifici, applicato principalmente al settore civile e commerciale. Permette di gestire e controllare in maniera centralizzati sistemi come HVAC, illuminazione, allarmistica, sicurezza e controllo accessi. L'evoluzione dei BMS, con applicazione specifica finalizzata alla riduzione dei consumi energetici prende il nome di BEMS [23].
- **EMS** (Energy Management System) – Nasce dalla norma ISO 50001 e si riferisce a un sistema gestionale finalizzato alla riduzione continua dei consumi energetici tramite audit energetici e la definizione di precise strategie energetiche. Spesso utilizza sistemi tecnici come EMIS e BEMS per ottenere tali obiettivi.
- **EMIS** (Energy Management Information System) - È lo strumento tecnico alla base dei sistemi di monitoraggio. Comprende sia le tecnologie hardware necessarie al monitoraggio dei consumi, sia quelle software per la visualizzazione e l'analisi dei dati e la sintesi in indici macroscopici (EnPI – Energy Performance Indicator) delle informazioni raccolte.
- **DMS (Distributed Monitoring System)** – Rappresenta la parte hardware di un EMS, comprendendo vari dispositivi di misura distribuiti geograficamente all'interno della struttura e l'architettura logico-informatica alla quale sottendono.

Per implementare un sistema efficace di gestione dell'energia, come previsto dalla norma ISO 50001, è essenziale seguire un insieme articolato di passaggi. Tra questi, riveste particolare importanza l'analisi continuativa degli usi energetici significativi, dei principali

fattori che li influenzano e di tutte le variabili correlate che possono contribuire al consumo o alla produzione di energia. Una volta raccolte tali informazioni, esse devono essere organizzate, elaborate e rese interpretabili, al fine di fornire risultati utili e supportare decisioni consapevoli.

A questo proposito, la norma UNI CEI EN 17627 [24] propone un'architettura funzionale di riferimento per i sistemi di misura e monitoraggio dell'efficienza energetica. Tale architettura sottolinea che il sistema non deve limitarsi alla sola acquisizione di grandezze energetiche, ma deve essere in grado di raccogliere tutti i dati e le informazioni necessari a comprendere come, quando e perché l'energia viene utilizzata o prodotta all'interno dell'organizzazione. Inoltre, tali dati devono essere elaborati e trasformati, con il massimo grado possibile di automazione, in informazioni leggibili, visualizzabili e fruibili per le diverse figure coinvolte nella gestione energetica. Più in dettaglio questa architettura funzionale di riferimento deve rispondere a una serie di requisiti fondamentali:

- **Acquisizione completa dei dati:** il sistema deve essere in grado di misurare e raccogliere tutte le grandezze necessarie al calcolo degli Indici di Prestazione Energetica (IPE). Oltre ai consumi energetici, devono essere rilevati anche i parametri influenzanti, ossia quelle variabili quantificabili che impattano direttamente o indirettamente sull'uso dell'energia.
- **Correlazione con eventi e condizioni operative:** è essenziale acquisire, oltre ai dati energetici, eventi pianificati e imprevisti, nonché grandezze di contesto che possano fornire ulteriori elementi per comprendere l'impiego dell'energia. Tra questi si includono, ad esempio, gli intervalli di manutenzione, i guasti, le anomalie, l'andamento produttivo o del servizio erogato, nonché eventuali scostamenti dai parametri di esercizio ottimali.
- **Accessibilità e fruibilità per gli utenti:** il sistema deve facilitare l'utilizzo delle informazioni da parte di tutti i soggetti coinvolti nei processi decisionali che influenzano i consumi energetici, inclusi responsabili energetici interni o esterni, responsabili di processo e manutenzione, uffici acquisti, direzione aziendale, fornitori di energia e altri stakeholder.
- **Apertura:** la piattaforma deve essere in grado di accogliere progressivamente nuove funzionalità, rispondendo alle esigenze crescenti dell'azienda senza richiedere la modifica dell'architettura preesistente.

- **Modularità e scalabilità software:** il sistema deve supportare l'aggiunta modulare di nuove funzioni applicative, consentendo un'evoluzione graduale delle capacità informative e analitiche.
- **Scalabilità hardware:** deve essere possibile ampliare il numero di punti di misura in maniera progressiva, a partire da una configurazione iniziale minima, con una crescita modulata e sostenibile.
- **Sostenibilità economica:** il sistema deve presentare costi contenuti e giustificabili in tutte le fasi – progettazione, installazione, gestione operativa, manutenzione ed espansione – in modo da risultare compatibile con le logiche di investimento dell'azienda in ambito di efficienza energetica.
- **Universalità:** l'architettura proposta deve essere applicabile a qualunque organizzazione, indipendentemente dalla sua dimensione, settore o complessità impiantistica.

L'implementazione di tale architettura richiede un approccio top-down, ovvero una pianificazione gerarchica nella quale si procede preliminarmente alla definizione delle priorità e dei punti di misura significativi.

La fase iniziale prevede un'attenta analisi del contesto energetico, che comprende la classificazione dei siti, delle aree funzionali, dei flussi e degli usi energetici da monitorare, integrata da una valutazione delle risorse economiche e umane disponibili.

Successivamente, è necessario identificare le variabili influenzanti gli usi energetici significativi, che possono essere suddivise in:

- **Fattori influenzanti operativi:** derivano dalla conoscenza dei processi produttivi e dell'organizzazione. Possono essere:
 - **Dinamici**, come i volumi di produzione, i livelli di servizio o i carichi di lavoro, che variano nel tempo;
 - **Statici**, come le superfici calpestabili, le volumetrie degli ambienti o la tipologia impiantistica installata.
- **Fattori influenzanti ambientali:** includono condizioni climatiche esterne (temperatura dell'aria, umidità, radiazione solare, ecc.) e condizioni microclimatiche

interne, ovvero quei parametri fisici ambientali che caratterizzano gli ambienti di lavoro e i processi industriali, influenzando sia il comfort che i consumi.

L'architettura di monitoraggio può essere considerata a tutti gli effetti una strategia strutturata volta a individuare e sviluppare soluzioni innovative per supportare la politica energetica delle organizzazioni. In questo contesto, sono stati elaborati numerosi sistemi di monitoraggio, basati su tecnologie e piattaforme dedicate, progettati per rispondere alle esigenze di efficienza, integrazione e scalabilità.

Per affrontare in modo efficace queste sfide, è stato proposto un modello architetturale che consente di progettare sistemi di monitoraggio flessibili e modulari, in grado di integrare dispositivi esistenti oltre a nuove installazioni.

Il modello si basa su due principi fondamentali:

- Modularità, che consente di costruire il sistema in maniera incrementale e adattabile alle specifiche esigenze;
- Stratificazione a livelli funzionali, che fornisce una struttura ordinata per identificare i componenti hardware e software e le loro modalità di interconnessione.

Questa architettura offre un riferimento generale per la progettazione di sistemi di monitoraggio dell'efficienza energetica, applicabili sia in nuove realizzazioni sia nell'integrazione di sistemi preesistenti.

Le funzioni del sistema di monitoraggio sono organizzate in quattro livelli, presentati secondo un approccio top-down: si parte dalle informazioni ad alto livello, già elaborate e destinate all'utente finale, fino ad arrivare ai dati grezzi acquisiti alla base del sistema. I livelli sono così articolati:

- **Livello 4: Presentazione delle Informazioni (Information Presentation)**
Visualizzazione, reportistica e strumenti decisionali basati sui dati elaborati.
- **Livello 3: Correlazione e Analisi dei Dati (Data Correlation and Analysis)**
Elaborazione dei dati per estrarre informazioni significative, individuare relazioni e supportare il miglioramento energetico.
- **Livello 2: Classificazione, Trasformazione e Memorizzazione dei Dati (Data Classification, Transformation and Storage)**

Organizzazione strutturata, normalizzazione e archiviazione delle informazioni raccolte.

- **Livello 1: Acquisizione, Consolidamento e Adattamento dei Dati e degli Eventi di Base (Data Acquisition, Collection and Adaptation)**
Raccolta e pre-elaborazione dei dati provenienti dai dispositivi di campo e dagli eventi operativi.

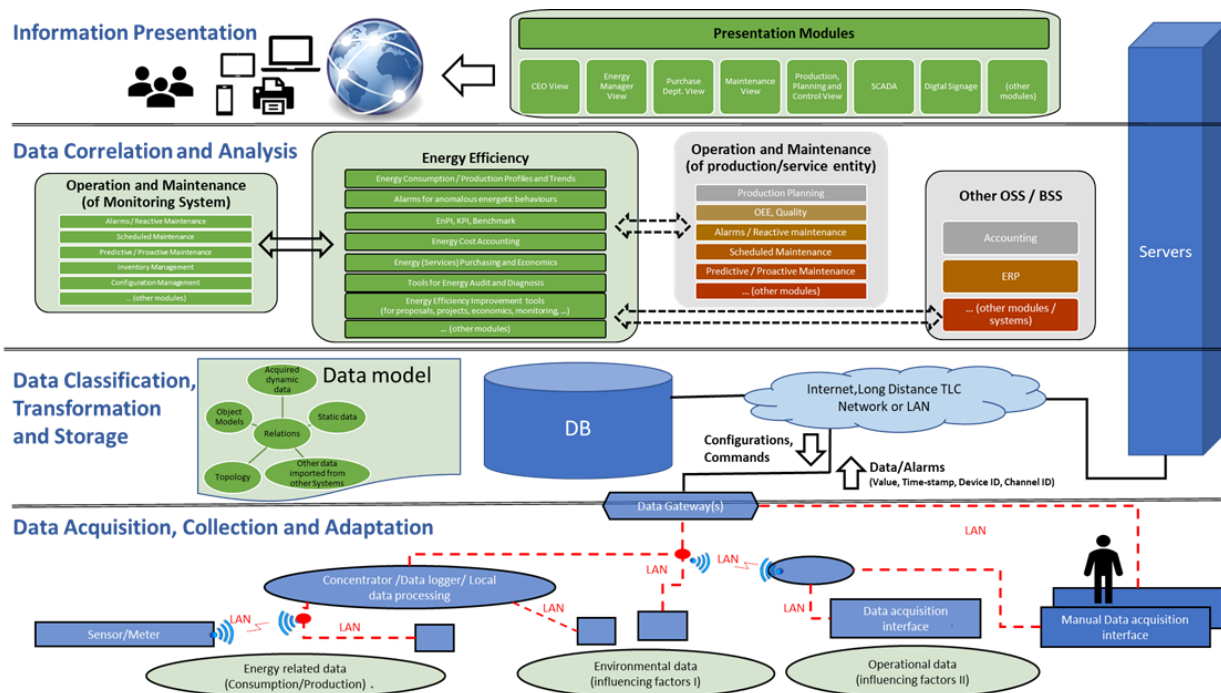


Figura 10 Esempio di architettura di un sistema di monitoraggio

Presentazione delle Informazioni

La presentazione delle informazioni costituisce un elemento essenziale del sistema di monitoraggio, in quanto rappresenta il principale strumento attraverso cui trasmettere in maniera appropriata e tempestiva i dati elaborati ai diversi soggetti coinvolti, interni ed esterni all'organizzazione, in funzione dei rispettivi livelli di responsabilità. In tale ottica, ciascun soggetto dovrebbe poter accedere a report e cruscotti personalizzati, specificamente progettati per rispondere alle proprie esigenze operative e decisionali. La personalizzazione dei dati richiede necessariamente l'adozione di politiche di gestione degli accessi e dei permessi, finalizzate a garantire la sicurezza delle informazioni e a consentire, alle figure autorizzate, l'utilizzo di strumenti software e interfacce grafiche dedicate. Tali strumenti devono permettere sia l'analisi puntuale dei dati non aggregati sia l'aggregazione dinamica delle informazioni (funzionalità di zoom-in e zoom-out), in relazione alle specifiche

funzioni svolte e alle aree di interesse. È il caso, ad esempio, delle figure professionali quali l'Energy Manager o gli operatori responsabili della gestione della manutenzione.

A questo livello, possono essere integrati moduli applicativi quali:

- **Sistemi SCADA** (Supervisory Control and Data Acquisition), finalizzati a migliorare la capacità di rilevazione e reazione agli eventi critici da parte del personale operativo;
- **Sistemi di Digital Signage**, destinati a comunicare, sia al personale interno sia a soggetti esterni, informazioni relative alla performance energetica, ai risparmi conseguiti in termini di emissioni di CO₂ o ad altri indicatori di sostenibilità ambientale pertinenti all'organizzazione.

Dal punto di vista infrastrutturale, il software preposto alla presentazione delle informazioni può risiedere sia su server locali di proprietà dell'organizzazione, sia su server remoti, attraverso l'impiego di soluzioni di cloud computing fornite da terze parti. L'impiego di interfacce Web, compatibili con dispositivi fissi e mobili, rappresenta inoltre una soluzione efficace per facilitare l'accesso ai report, ai cruscotti informativi e per garantire la tempestiva segnalazione di anomalie o allarmi.

Correlazione e Analisi dei dati

Il livello dedicato alla correlazione e analisi dei dati può essere considerato come uno strato elaborativo di ordine superiore, finalizzato a generare informazioni arricchite di valore aggiunto rispetto alle elaborazioni standard comunemente adottate. In ragione di tale ruolo, questo livello deve essere caratterizzato da modularità e scalabilità, al fine di consentire l'introduzione progressiva di nuove funzionalità, in linea con le esigenze evolutive dell'organizzazione.

Poiché l'obiettivo è fornire uno strumento avanzato per l'analisi e la gestione dell'efficienza energetica, si possono individuare diversi moduli software specialistici, tra cui:

- Moduli per la valutazione di Energy Performance Indicators (EnPI) e Key Performance Indicators (KPI), nonché per la definizione di baseline di riferimento e benchmark di settore;
- Moduli per l'analisi dei consumi e degli EnPI anomali, mediante l'utilizzo di soglie statiche o dinamiche basate su parametri stagionali o di utilizzo;

- Moduli per l'analisi dei profili di utilizzo e produzione di energia, dei relativi trend e delle previsioni future. In particolare, l'analisi storica dei profili energetici, condotta su finestre temporali adeguate e con riferimento agli obiettivi prestabiliti, consente di individuare aree critiche o prioritarie per l'implementazione di interventi correttivi, oltre a verificare successivamente l'efficacia delle azioni intraprese. I moduli di analisi dei trend possono inoltre identificare precocemente anomalie operative o il degrado dei sistemi, mentre i moduli di previsione risultano utili per la pianificazione degli approvvigionamenti energetici e per la creazione di profili di consumo di riferimento;
- Moduli per l'analisi dell'efficienza dei consumi e la contabilità dei costi energetici. Tali strumenti consentono di individuare opportunità di risparmio energetico, a parità di quantità e qualità di prodotto o servizio, attraverso l'ottimizzazione dei punti di funzionamento o la sostituzione di apparecchiature con soluzioni più efficienti. La contabilità energetica, inoltre, permette di "monetizzare" i consumi, calcolando indicatori quali l'incidenza dei costi energetici sui costi di produzione o di servizio e la ripartizione per centro di costo. È importante sottolineare come la storicizzazione dei dati energetici, correlata ai volumi produttivi o di servizio, fornisca strumenti di supporto decisionale comprensibili a tutti i livelli dell'organizzazione, facilitando sia la valutazione economica di nuovi interventi di efficientamento sia la verifica dei risultati ottenuti rispetto agli obiettivi previsti (tempi di ritorno dell'investimento, ottenimento di Titoli di Efficienza Energetica - TEE, ecc.);
- Moduli per la diagnostica e la manutenzione del sistema di misura e monitoraggio, al fine di garantire la continuità e l'affidabilità del processo di raccolta dati.

Grazie all'ampiezza dei dati acquisiti, alla flessibilità di integrazione di ulteriori strumenti di misura e alla possibilità di sviluppare moduli software dedicati, il sistema può espandersi oltre il solo monitoraggio della performance energetica, abilitando funzionalità aggiuntive quali:

- monitoraggio della Power Quality;
- gestione della potenza lato domanda (Demand Side Management), regolazione dei carichi interni, gestione di sistemi di accumulo;
- implementazione di strategie di diagnostica e manutenzione predittiva dei carichi monitorati.

Le funzionalità di questo livello possono inoltre interagire con i sistemi di Operation and Business Support già presenti in azienda, sfruttando le informazioni disponibili (ad esempio, dati sulla produzione utile o piani di produzione) senza la necessità di introdurre nuovi sottosistemi di acquisizione (in coerenza con quanto previsto al Livello 1).

Dal punto di vista infrastrutturale, anche il software di questo livello può essere ospitato sia su server locali, sia su server remoti, utilizzando soluzioni di cloud computing fornite da terze parti.

Classificazione, Trasformazione e Memorizzazione dei dati

I dati necessari al sistema di misura e monitoraggio dell'efficienza energetica possono essere eterogenei per natura. Oltre ai dati dinamici acquisiti in tempo reale dal campo — come misure, eventi e allarmi — è indispensabile integrare anche dati statici o quasi statici, relativi a:

- L'anagrafica e le caratteristiche dei dispositivi presenti in campo, siano essi oggetti da monitorare o componenti del sistema stesso, comprendendo: matricole, dati di targa, parametri operativi e di configurazione, specifiche tecniche che influenzano i consumi energetici, nonché informazioni relative a manutenzione e taratura.
- Le caratteristiche degli apparati deputati alla cyber security, quali i meccanismi di identificazione e autenticazione di dispositivi e utenti, e la gestione sicura degli accessi (ad esempio tramite password).
- La topologia e il posizionamento fisico degli apparati, funzionali alla creazione di mappe e viste interattive del sistema.

A queste categorie di dati possono inoltre aggiungersi informazioni relative alla programmazione delle attività e alle modalità operative di produzione.

Per una gestione efficiente e flessibile di questo ampio patrimonio informativo, è necessaria la definizione di un modello dati adeguato, unitamente a processi di adattamento e virtualizzazione dei dati, così da rendere indipendente il software applicativo dei livelli superiori dai formati e dalle modalità di acquisizione dei dati di base. A supporto di tali esigenze, può essere opportuno l'impiego di database relazionali e/o orientati agli oggetti, per ottimizzare l'organizzazione, la manutenzione e la fruibilità dei dati stessi.

Dal punto di vista infrastrutturale, il software e il database relativi a questo livello possono essere ospitati sia su server locali dell'organizzazione, sia su server remoti, anche attraverso soluzioni di cloud computing fornite da terze parti.

Acquisizione, Consolidamento e Adattamento di dati ed eventi base

I dati raccolti, consolidati e adattati dal Livello 1 sono prevalentemente dinamici e si riferiscono a tre principali categorie:

- **Dati direttamente correlati all'energia:** comprendono i consumi e gli usi energetici dei processi monitorati, con particolare attenzione alla produzione, all'accumulo, all'immissione in rete (feed-in) e all'utilizzo dei diversi vettori energetici coinvolti (elettricità, acqua, aria, gas e vapore). A supporto di tale monitoraggio, vengono impiegati strumenti quali contatori fiscali, analizzatori di rete e misuratori dedicati a grandezze fisiche (ad esempio, flussi d'aria, illuminamento e temperatura).
- **Dati relativi a variabili ambientali rilevanti:** riguardano grandezze fisiche che influenzano in modo significativo i consumi energetici dei processi monitorati, tra cui temperatura, pressione, umidità e irraggiamento solare. Tali informazioni sono acquisite tramite dispositivi di misura specifici.
- **Dati relativi a variabili operative:** includono fattori che incidono sui consumi energetici, come il mix produttivo, i volumi di produzione, gli intervalli di manutenzione e i dati operativi di produzione e dei servizi ausiliari. La raccolta di questi dati può avvenire automaticamente tramite reti di acquisizione dati (ad esempio, interfacciamento con PLC o sistemi di controllo bordo macchina) o mediante interazione con i sistemi gestionali aziendali.

Il Livello 1 comprende:

A. Dispositivi di misura: contatori, sensori, sonde, misuratori e interfacce dati in campo. La selezione di tali dispositivi deve garantire un'adeguata precisione di misura, frequenze di rilevazione appropriate, piani periodici di taratura e una valutazione attenta dei costi di installazione, attivazione e manutenzione.

B. Dispositivi e interfacce per l'acquisizione manuale di dati: strumenti come tablet, tastierini o lettori. In alcune circostanze, l'integrazione diretta di un dispositivo di misura nella rete di acquisizione può risultare complessa o antieconomica, rendendo necessario il ricorso all'inserimento manuale dei dati, soprattutto per eventi operativi rilevanti come lunghi fermi di produzione o carichi eccezionali.

C. Concentratori Dati (Data Concentrators o Data Loggers): dispositivi incaricati della raccolta, elaborazione (ad esempio, aggiunta di codici identificativi e marcature temporali) e memorizzazione locale dei dati provenienti dai dispositivi di misura. I Concentratori possono implementare funzioni di archiviazione locale per garantire l'integrità dei dati in caso di interruzioni di comunicazione, nonché logiche di controllo e gestione di allarmi (es. segnalazione di guasti o anomalie di misura).

D. Data Gateway: dispositivi di comunicazione che aggregano e ritrasmettono i dati provenienti da una sezione della rete di acquisizione. I Gateway svolgono funzioni di adattamento di protocolli e formati di comunicazione, possono operare anche come Concentratori Dati, e gestiscono il collegamento con i sistemi di livello superiore (server, database) tramite connessioni LAN o reti di telecomunicazione a lunga distanza. Inoltre, sono in grado di trasferire configurazioni o comandi ai componenti della rete locale.

E. Local Area Network (LAN): infrastruttura di rete utilizzata per interconnettere Data Gateway, Concentratori Dati, dispositivi di misura e interfacce di inserimento manuale. La scelta dei mezzi di trasmissione (cablato o wireless), dei protocolli di comunicazione, della topologia di rete (albero, stella, maglia, ibrida) e delle strategie di instradamento e ridondanza deve basarsi su criteri di robustezza, capacità di recupero dati, gestione del traffico di rete e contenimento dei costi di implementazione e manutenzione. È essenziale, ad esempio, evitare collegamenti wireless in ambienti ad alta interferenza elettromagnetica.

Criteri per la Progettazione e l'Implementazione di Sistemi di Monitoraggio dell'Efficienza Energetica

Esistono diverse opzioni architetture, che si distinguono per vari aspetti, tra cui:

- Ridondanza hardware e software;
- Allocazione del database e dei moduli software dei Livelli 2, 3 e 4 (locale, cloud, ibrido);
- Topologia della rete (albero, stella, maglia, ibrida), tipologia di connessione (cablata, wireless, ibrida) e protocolli di comunicazione per la raccolta e il trasferimento dei dati;
- Struttura della rete di acquisizione dati del Livello 1, inclusi il numero di sottolivelli e la relativa topologia;

- Integrazione con i sistemi di supporto operativo e gestionale (Operating and Business Support Systems) già presenti nell'organizzazione.

L'architettura funzionale di riferimento è progettata per essere scalabile, consentendo l'espansione del sistema attraverso fasi successive e sostenibili, con l'aggiunta di componenti modulari al livello appropriato. Questo approccio segue una logica di crescita sostenibile, sia dal punto di vista economico che organizzativo, in linea con i principi dell'ISO 50001 e del ciclo di Deming, che prevede il consolidamento iniziale su una base solida, seguita da progressivi miglioramenti.

È possibile implementare sia sistemi completamente locali, con tutti i componenti hardware e software in un singolo sito, sia sistemi distribuiti, come nel caso di configurazioni multi-sito o con remotizzazione delle funzioni di livello superiore in un'infrastruttura cloud.

2.2.3 Building automation

La building automation è uno dei settori in cui l'IoT si è sviluppato maggiormente e in maniera più precoce, rendendola un elemento chiave nella progettazione e nella gestione degli edifici moderni, in risposta alla crescente domanda di efficienza energetica, comfort ambientale e sicurezza operativa.

La building automation rappresenta un insieme di tecnologie IT (Information Technology) e OT (Operational Technology) applicate a settori edilizi differenti che integrate insieme consentono il controllo, la supervisione e l'ottimizzazione degli impianti tecnologici presenti in un edificio.

Si differenzia dalla domotica principalmente per il campo di applicazione: mentre la domotica si applica in ambito residenziale la building automation è tipicamente riferita a edifici del settore terziario e industriale, come scuole, uffici, hotel, centri commerciali e aeroporti, dove la complessità impiantistica e gestionale richiede soluzioni robuste, resilienti, scalabili e più articolate.

Le architetture di sistema applicate in questo contesto si declinano solitamente su più livelli [25]:

1. **Livello di campo** - comprende i dispositivi dislocati all'interno dell'edificio, principalmente sensoristica e attuatori. Questi possono essere nativamente comunicanti con protocolli aperti o proprietari, o vengono digitalizzati tramite PLC.

2. **Livello di automazione** – gli stessi PLC utilizzati per la digitalizzazione svolgono solitamente anche le funzioni di concentratori e di centrale di automazione locale. In sistemi complessi, infatti, è buona norma suddividere le logiche di automazione decentralizzandole: se un dispositivo concentra tutte le informazioni relative a una specifica macchina, la regolazione e il controllo di tale macchina può essere convenientemente affidata al concentratore stesso, garantendo il funzionamento della macchina anche in caso di perdita di comunicazione o guasto al sistema di supervisione centrale. Tutte le informazioni e le logiche di automazioni vengono comunque riportate a livello centrale per garantire uniformità e completezza alla supervisione dell'intero edificio.
3. **Livello di supervisione e gestione** – i vari concentratori opportunamente dislocati nell'edificio fanno capo ad un BMS (Building Management System) centrale, solitamente installato in un server, in grado di gestire armonicamente l'intero impianto tecnico o l'insieme di più impianti attuando logiche di regolazione di alto livello (non gestisce a livello di singoli componenti ma a livello di impianto), gestendo l'interazione tra i diversi macchinari, gestendo lo stoccaggio e la storicizzazione dei dati, generando la reportistica e fornendo una o più interfacce grafiche per gli utenti finali.

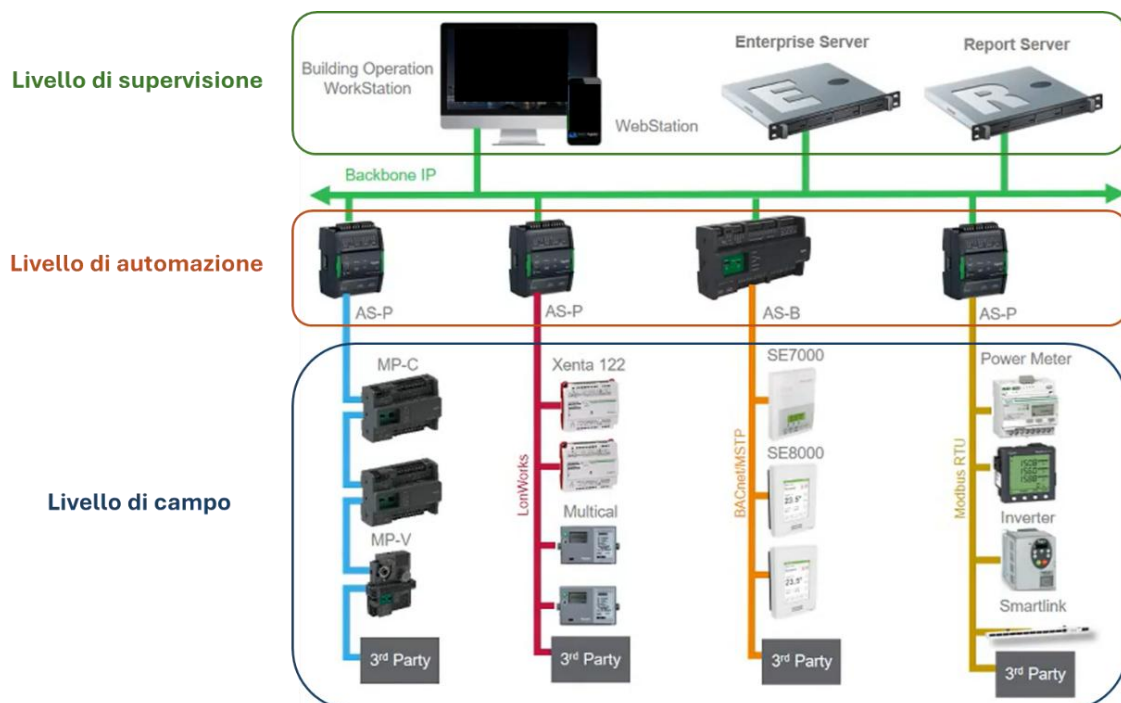


Figura 11 architettura di un sistema di building automation

Le funzioni principali implementabili nei comuni BMS sono [26]:

- **Controllo HVAC:** gestisce gli impianti di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione con il duplice obiettivo di garantire il comfort termoigrometrico e olfattivo ottimizzando i consumi energetici. Un sistema di controllo completo copre gli impianti meccanici dalla generazione del calore/freddo fino all'emissione di aria calda negli ambienti. Per quanto riguarda la generazione, a livello di campo si ha a che fare con macchine complesse quali generatori di vapore, caldaie a bruciatori o cogeneratori per il riscaldamento e chiller per il raffrescamento. Solitamente questi macchinari vengono commercializzati, nativamente o tramite l'aggiunta di moduli, prevedendo già la possibilità di essere integrati in sistemi di building automation, il più delle volte sposando protocolli aperti come ModBUS o BACNet. In macchinari più datati è comunque sempre possibile accedere a dei morsetti per la comunicazione di informazioni di base (stato, comando e allarmi) tramite pin digitali da collegare ad un digitalizzatore tipicamente un concentratore con eventuali moduli aggiuntivi per l'acquisizione di segnali AI (Analog Input), DI (Digital Input), AO (Analog Output) e DO (Digital Output). Data la complessità di questi sistemi, la gestione dei parametri di funzionamento della macchina non viene inclusa nel sistema dell'edificio ma affidata alle centraline di controllo della macchina stessa, potendo tuttavia gestire parametri macroscopici come temperature di setpoint, modalità di funzionamento o avvio e arresto.

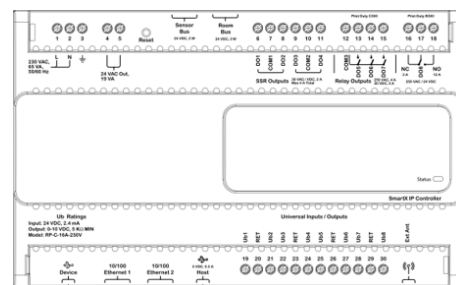


Figura 12 esempio di digitalizzatore e concentratore

Lo stesso discorso può essere fatto per alcuni componenti degli impianti di distribuzione dei fluidi termovettori. Componenti come pompe e pompe gemellari possono essere integrate in ModBUS quando disponibile (solitamente messo a disposizione dall'inverter in pompe a portata variabile) o tramite i morsetti di stato comando e allarme collegati a un digitalizzatore. La digitalizzazione dei segnali AI, AO, DI e DO è la strada tipicamente percorsa per l'integrazione di valvole motorizzate miscelatrici, deviatrici e a due vie, serrande motorizzate, e i sensori e attuatori a servizio delle UTA (sensori di temperatura, pressione, pressione differenziale, umidità, attuatori per i ventilatori, ecc.).

Per i moduli ambiente invece, che spesso comprendono oltre all'interfaccia uomo impianto anche sensoristica per temperatura, umidità e qualità dell'aria e in alcuni

casi attuatori per ventilconvettori locali, l'integrazione varia molto in base alle funzioni che mettono a disposizione e al produttore.

- **Illuminazione:** la gestione degli impianti di illuminazione può essere affidata a sistemi KNX, solitamente presenti per la gestione anche degli oscuranti, dell'apertura automatica delle finestre, sensori di presenza o altri servizi connessi agli ambienti abitati. In alternativa è possibile creare delle isole DALI dedicate a singole stanze o sezioni dell'edificio, poste al di sotto di un sistema KNX generale tramite gateway DALI/KNX. Questa soluzione è tra le più apprezzate dai progettisti e dai system integrator in quanto consente di sfruttare la semplicità di programmazione dei sistemi DALI e la completezza funzionale tipica del KNX, decongestionando allo stesso tempo le linee KNX. In edifici di grandi dimensioni tipicamente tutta la componentistica IoT viene inserita nel quadro elettrico o in quadri dedicati, evitando il più possibile la distribuzione geografica dei dispositivi all'interno degli ambienti (ad esempio in scatole di derivazione o scatole portafrutti). I vantaggi nel cablaggio tipici delle tecnologie basate su sistemi BUS vengono meno, ma si ha un cospicuo ritorno per quanto riguarda la comodità di installazione e la facilità delle successive attività di manutenzione.
- **Controllo accessi e sistemi antincendio:** La gestione di impianti delicati in termini di sicurezza della persona e antintrusione viene affidata a sistemi dedicati chiusi. In particolare, per i sistemi antincendio la possibilità di integrazione risulta spesso minima, potendo esportare per lo più stati e allarmi. Per i sistemi antintrusione le possibilità sono leggermente più ampie, potendo esporre anche controlli sull'attivazione e la disattivazione dei sistemi stessi e, in alcuni casi, gli stati della sensoristica; mentre per il controllo accessi (generazione dei badge per dipendenti in edifici ad uso ufficio o per i clienti in edificio ad uso alberghiero) i sistemi più comuni possono essere integrati completamente e nativamente, sistemi meno diffusi possono essere integrati con sviluppi software ad hoc.

2.2.4 Il risparmio energetico nella building automation: UNI EN ISO 52120

Il risparmio energetico derivante dall'introduzione di sistemi di controllo e automazione degli edifici (BACS) può essere stimato e certificato per mezzo della norma UNI EN ISO 52120.

Questa normativa ha sostituito la precedente EN UNI 15232 [27], nata nel 2007 a seguito dell'emanazione, nel 2002, da parte dell'Unione Europea della direttiva 2002/91/EC (meglio

conosciuta come “EPBD” – Energy Performance of Building Directive) [28]**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, in risposta alla necessita di disporre di strumenti concreti per la valutazione degli effetti dell’automazione e della gestione tecnica sui consumi energetici degli edifici.

La norma definisce quattro classi “BACS” di efficienza energetica per classificare i sistemi di automazione degli edifici distinguendo tra settore residenziale e non residenziale. Queste quattro classi, dalla D alla A, non hanno alcuna corrispondenza diretta con le sette classi di efficienza energetica dell’edificio (A, B, C, D, E, F, e G), definite dalla EN 15217 [29], bensì rappresentano sistemi di automazione con efficienza energetica crescente:

- Classe D “NON ENERGY EFFICIENT”: comprende gli impianti tecnici tradizionali e privi di automazione e controllo.
- Classe C “STANDARD” (riferimento): corrisponde a edifici dotati di sistema di automazione e controllo “tradizionali”, eventualmente dotati di BUS di comunicazione, con livelli prestazionali minimi rispetto alle loro reali potenzialità.
- Classe B “ADVANCED”: relativa a edifici dotati di un sistema BAC avanzato e dotati di funzioni di gestione degli impianti tecnici di edificio (TBM) specifiche per una gestione centralizzata e coordinata dei singoli impianti. “I dispositivi di controllo delle stanze devono essere in grado di comunicare con il sistema di automazione dell’edificio”.
- Classe A “HIGH ENERGY PERFORMANCE”: corrisponde a sistemi BAC e TBM ad “alte prestazioni energetiche”, cioè con livelli di precisione e completezza del controllo automatico tali da garantire elevate prestazioni energetiche all’impianto. “I dispositivi di controllo delle stanze devono essere in grado di gestire impianti HVAC tenendo conto di diversi fattori (ad esempio, valori prestabiliti basati sulla rilevazione dell’occupazione, sulla qualità dell’aria, ecc.) ed includere funzioni aggiuntive integrate per le relazioni multidisciplinari tra HVAC e vari servizi dell’edificio (ad esempio, elettricità, illuminazione, schermatura solare, ecc.)”.

Nonostante la classe C sia considerata dell’ente normatore la classe di riferimento, poiché considerata lo standard tecnologico di partenza, occorre sottolineare che tipicamente il livello medio del parco tecnologico installato è per la maggior parte corrispondente alla classe D.

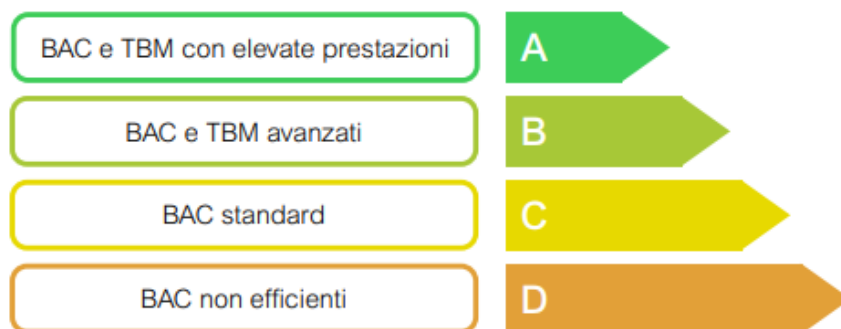


Figura 13 classi BACS secondo la UNI EN ISO 52120

Per determinare la classe BACS di appartenenza di un sistema la norma mette a disposizione tabelle riassuntive delle più comuni funzioni BACS e TBM (Technical Building Management) raggruppate per tipologia applicativa:

- Riscaldamento
- Acqua calda sanitaria
- Raffrescamento
- Ventilazione e Condizionamento
- Illuminazione
- Schermature Solari
- Sistemi TBM

Per ogni funzione di automazione vengono identificati i livelli minimi prestazionali da garantire per l'appartenenza a una determinata classe di efficienza, distinguendo tra edifici residenziali ed edifici non residenziali.

Un sistema di automazione può essere considerato appartenente ad una classe se tutte le funzioni che implementa siano almeno di quella classe. Ciononostante, anche implementazioni parziali possono consentire risparmi energetici. Le funzioni che si riferiscono ad un impianto o una parte di esso non installato nell'edificio non devono essere considerate ai fini della determinazione della classe di efficienza BACS. Inoltre, le funzioni che non hanno un impatto sostanziale (minore del 5% del consumo di energia totale) possono essere trascurate.

A titolo di esempio si riportano le tabelle relative ai sistemi di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria.

CONTROLLO RISCALDAMENTO

Codice di funzione			Definizione delle Classi							
Codice di funzione	SE UNI EN ISO 52120-1		Residenziale				Non Residenziale			
			D	C	B	A	D	C	B	A
Controllo di emissione										
La funzione di controllo è applicata sul terminale a livello ambiente; per il tipo 1 una funzione può controllare diversi ambienti										
	0	Nessun controllo automatico								
	1	Controllo automatico centralizzato								
SE-H1C	2	Controllo automatico di ogni ambiente con valvole termostatiche o regolatore elettronico								
SE-H1B	3	Controllo automatico di ogni ambiente con comunicazione tra i regolatori e verso il sistema BAC *								
SE-H1A	4	Controllo integrato di ogni locale con comunicazione e controllo di presenza **								
* Per impianti con elevata inerzia termica (es. riscaldamento a pavimento) la funzione diventa di classe A										
** Non applicata a impianti con elevata inerzia termica										
Controllo di emissione per solai termo-attivi										
	0	Nessun controllo automatico								
SE-H2C	1	Controllo automatico centralizzato								
SE-H2B	2	Controllo automatico centralizzato avanzato								
SE-H2A	3	Controllo automatico centrale avanzato a funzionamento intermittente e feed-back della temperatura ambiente								
Controllo temperatura acqua nella rete di distribuzione (mandata e ritorno)										
Funzioni simili possono essere applicate al controllo di reti di riscaldamento elettrico										
	0	Nessun controllo automatico								
SE-H3C	1	Compensazione con la temperatura esterna								
SE-H3A	2	Controllo basato sulla richiesta termica								
Controllo delle pompe di distribuzione										
Le pompe controllate possono essere installate a diversi livelli nella rete di distribuzione										
	0	Nessun controllo automatico								
SE-H4C	1	Controllo ON/OFF								
	2	Controllo pompa multi-stadio								
SE-H4A	3	Controllo pompe a velocità variabile								
	4	Controllo pompe a velocità variabile (basato su segnale esterno)								
Bilanciamento idronico della rete di riscaldamento										
Il bilanciamento idronico è applicato in emissione o a un gruppo di emettitori maggiore di 10										
	0	Nessun bilanciamento								
	1	Bilanciato staticamente per unità terminale senza bilanciamento di gruppo								
	2	Bilanciato staticamente per unità terminale con bilanciamento statico di gruppo								
SE-H4aC	3	Bilanciato staticamente per unità terminale con bilanciamento dinamico a gruppi (ad esempio per piano)								
SE-H4aA	4	Bilanciato dinamicamente per unità terminale								
Controllo intermittente della emissione e/o distribuzione										
Un solo regolatore può controllare diversi ambienti/zone aventi lo stesso profilo di occupazione										
	0	Nessun controllo automatico								
SE-H5C	1	Controllo automatico con programma orario fisso								
SE-H5B	2	Controllo automatico con partenza/arresto ottimizzato								
SE-H5A	3	Controllo automatico con calcolo della richiesta termica								
Controllo dei generatori a combustione o del teleriscaldamento										
	0	Temperatura costante								
SE-H6C	1	Temperatura termovettore variabile in dipendenza da quella esterna								
SE-H6A	2	Temperatura variabile in dipendenza dal carico								
Controllo del generatore a pompe di calore										
	0	Temperatura costante								
SE-H7C	1	Temperatura termovettore variabile in dipendenza da quella esterna								
SE-H7A	2	Temperatura termovettore variabile in dipendenza del carico o della richiesta								
Controllo dei generatori a unità esterna										
	0	Controllo On-Off								
SE-H8B	1	Controllo multistadio della capacità del generatore in funzione del carico o della richiesta								
SE-H8A	2	Controllo variabile della capacità del generatore in funzione del carico o della richiesta								
Controllo sequenziale di differenti generatori										
	0	Priorità basate solo sul tempo di funzionamento								
SE-H9C	1	Controllo in funzione di una lista di priorità fissa								
SE-H9B	2	Controllo in funzione di una lista di priorità dinamica								
SE-H9A	3	Controllo in funzione di una lista di priorità dinamica basata sulla previsione del carico								
Controllo dei serbatoi di accumulo dell'energia termica										
	0	Accumulo continuo								
SE-H10B	1	Accumulo del serbatoio a due sensori								
SE-H10A	2	Accumulo del serbatoio basato sulla previsione del carico								

Figura 14 Tabella di calcolo per il controllo del riscaldamento

CONTROLLO ACQUA CALDA SANITARIA

Codice di funzione	Rif. UNI EN ISO 52120-1		Definizione delle Classi							
			Residenziale				Non Residenziale			
			D	C	B	A	D	C	B	A
Controllo della temperatura di accumulo mediante riscaldatore elettrico integrato o pompa di calore										
	0	Controllo automatico ON/OFF								
SE-W1C	1	Regolazione automatica ON/OFF della temperatura di accumulo e programma orario								
SE-W1A	2	Regolazione automatica ON/OFF della temperatura di accumulo con programma orario. Gestione con sensori multipli								
Controllo della temperatura di accumulo usando generatore di calore										
	0	Controllo automatico ON/OFF								
SE-W2C	1	Controllo automatico ON/OFF e controllo temporale								
SE-W2A	2	Controllo automatico ON/OFF; controllo temporale, accumulo in funzione della richiesta o controllo della temperatura di ritorno e gestione con più sensori di temperatura								
Controllo della temperatura nel serbatoio con collettori solari e generazione di calore esterna										
	0	Controllo manuale per energia solare o generatore di calore								
SE-W3C	1	Controllo automatico per accumulo da fonte solare (prioritaria) e integrazione con altra fonte								
SE-W3A	2	Controllo automatico per accumulo da fonte solare (prioritaria) e integrazione con altra fonte, accumulo in funzione della richiesta, controllo della temperatura di ritorno e gestione con più sensori di temperatura								
Controllo delle pompe ACS										
	0	Nessun controllo temporale, funzionamento continuo								
SE-W4A	1	Controllo temporale								

Figura 15 Tabella di calcolo per il controllo dell'acqua calda sanitaria

La normativa prevede la possibilità di calcolare l'impatto di un sistema BACS sui consumi energetici di un edificio utilizzando due differenti approcci:

- **Metodo dettagliato:** è utilizzabile al meglio solo quando il sistema è completamente noto e permette di calcolare accuratamente l'impatto delle funzioni BACS sui consumi energetici dell'edificio, fornendo risultati puntuali e precisi. Il calcolo può seguire cinque differenti metodologie:
 - Metodo diretto: il calcolo delle prestazioni energetiche è basato su un simulazioni dettagliate o orarie;
 - Metodo basato sulla modalità operativa: considera diverse modalità operative per ogni singolo sistema tecnico, calcolando in sequenza il consumo energetico per ognuna di esse, ottenendo per somma il consumo totale di ogni applicazione;
 - Metodo basato sul tempo di funzionamento: è utilizzato quando il sistema di controllo ha un impatto diretto sul tempo di funzionamento dei dispositivi. L'impatto del sistema di controllo è considerato attraverso un coefficiente che caratterizza la funzione desiderata,

calcolato come rapporto fra la durata dell'azione di controllo dei dispositivi e la durata dell'intervallo di tempo considerato;

- Metodo basato sul set-point: è utilizzato quando il sistema di controllo ha un impatto diretto sull'accuratezza del controllo effettuato da un dispositivo in campo. Consiste nel prendere in considerazione nel calcolo del fabbisogno energetico la temperatura della stanza corretta in considerazione degli impatti del sistema di controllo;
- Metodo basato sul coefficiente di correzione: è utilizzato quando il sistema di controllo agisce in modo combinato su diversi fattori, come, ad esempio, tempi di funzionamento, set point di temperatura, ecc. Il coefficiente di correzione è determinato, mediante simulazioni, a partire da parametri rilevanti quali tipo di edificio, tipo di sistema, profilo dell'utente, clima, ecc.
- **Metodo dei fattori BACS:** è una procedura di calcolo semplificata basata su tabelle che permettono di ottenere una stima approssimativa dell'impatto delle funzioni BACS in base al confronto tra la classe ante e post-operam. Prevede quindi la valutazione della classe BACS dell'edificio secondo le tabelle sopra riportate, prima e dopo l'intervento e il calcolo del risparmio energetico ottenibile in percentuale, per ogni singolo campo d'applicazione tramite l'applicazione delle seguenti tabelle:

Energia termica in edifici non residenziali - energia per riscaldamento e raffrescamento																		
Tipologia edificio / locale	Classi e Fattori di Efficienza BAC								Risparmio (rif. classe D)				Risparmio (rif. C)					
	D		C (rif)		B		A		C/D		B/D		A/D		B/C		A/C	
	Senza Automazione		Automazione Standard		Automazione Avanzata		Alta Efficienza											
	Risc.	Raff.	Risc.	Raff.	Risc.	Raff.	Risc.	Raff.	Risc.	Raff.	Risc.	Raff.	Risc.	Raff.	Risc.	Raff.	Risc.	Raff.
Uffici	1,44	1,57	1	1	0,79	0,80	0,70	0,57	31%	36%	45%	49%	51%	64%	21%	20%	30%	43%
Sale conferenze	1,22	1,32	1	1	0,73	0,94	0,30	0,64	18%	24%	40%	29%	75%	52%	27%	6%	70%	36%
Scuole	1,20		1	1	0,88		0,80		17%		27%		33%		12%		20%	
Ospedali	1,31		1	1	0,91		0,86		24%		31%		34%		9%		14%	
Hotel	1,17	1,76	1	1	0,85	0,79	0,61	0,76	15%	43%	27%	55%	48%	57%	15%	21%	39%	24%
Ristoranti	1,21	1,39	1	1	0,76	0,94	0,69	0,60	17%	28%	37%	32%	43%	57%	24%	6%	31%	40%
Negozi / Grossisti	1,56	1,59	1	1	0,71	0,85	0,46	0,55	36%	37%	54%	47%	71%	65%	29%	15%	54%	45%

Figura 16 Tabella di calcolo per la stima del risparmio energetico (riscaldamento e raffrescamento)

Energia termica per acqua calda sanitaria in edifici non residenziali									
Tipologia edificio / locale	Classi e Fattori di Efficienza BAC				Risparmio (rif. classe D)			Risparmio (rif. C)	
	D	C (rif)	B	A					
	Senza Automazione	Automazione Standard	Automazione Avanzata	Alta Efficienza	C/D	B/D	A/D	B/C	A/C
Uffici Sale conferenze Scuole Ospedali Hotel Ristoranti Negozi / Grossisti Impianti sportivi Magazzini Edifici industriali	1,11	1,00	0,90	0,80	10%	19%	28%	10%	20%

Figura 17 Tabella di calcolo per la stima del risparmio energetico (acqua calda sanitaria)

Tali stime sono state calcolate confrontando il consumo annuale di energia di un locale standard di riferimento (EPBD 2006) con quello ottenuto, a parità di condizioni e nello stesso locale, a seguito dall'utilizzo di un sistema di automazione BACS/HBES appartenente alle diverse classi di efficienza.

Se è noto il consumo energetico ante-operam dei singoli settori di applicazione della norma è possibile infine stimare il risparmio ottenibile anche in termini assoluti.

2.2.5 Domotica

La domotica tradizionale: KNX

Quando si parla di building automation e, più in particolare, di domotica non si può non citare i sistemi KNX. Il protocollo KNX è stato già introdotto nella sezione dedicata ai protocolli, tuttavia, grazie al suo ruolo centrale nella domotica di alto profilo e in molte applicazioni di building automation, merita un approfondimento particolare in quanto dominatore assoluto della domotica che possiamo definire "tradizionale" (a differenza di quella che chiameremo di nuova generazione).

A partire dalla fondazione della KNX Association nel 1990, Konnex è riuscito ad acquisire un ruolo sempre più centrale diventando la tecnologia leader del settore tramite unione con altre organizzazioni di settore (BCI e EHS), promuovendo la definizione e la diffusione del protocollo KNX come standard realmente aperto e simbolo di qualità e interoperabilità di prodotti di diversi costruttori. Tra gli anni 2003 e 2013 questo ruolo viene riconosciuto a livello normativo, ricevendo prima l'approvazione dal CENELEC (Comitato europeo di normalizzazione elettrotecnica) come norma europea per i sistemi elettronici per la casa e l'edificio, come parte della serie EN 50090 [30], diventando poi standard mondiale (ISO/IEC 14543), venendo introdotta anche nella normativa cinese (GB/Z 20965) e statunitense (ANSI/ASHRAE 135).

La KNX Association ha il compito di: sviluppare e promuovere la tecnologia KNX, sviluppare, vendere e fornire supporto per il software di programmazione ETS, promuovere formazione KNX, attività di standardizzazione, e partnership scientifiche.

I sistemi KNX risultano standardizzati in ogni aspetto della comunicazione, a partire dai dispositivi, sottoposti a rigidi controlli da parte della KNX Association, passando per i mezzi trasmissivi, le topologie di rete, i livelli applicativi e di rappresentazione dei dati (telegramma KNX), fino ad arrivare al software ETS per la configurazione e programmazione dei sistemi.

Per quanto riguarda i **mezzi trasmissivi** esistono diverse possibilità: **TP** (twisted pair), doppino in rame intrecciato, soluzione principale, adottata nella maggior parte dei casi e spesso utilizzata anche in concomitanza con le altre; **radiofrequenza**, utilizzata quando risulta impossibile o eccessivamente svantaggiosa l'installazione via cavo (luoghi aperti, edifici di pregio storico dove non è possibile condurre opere murarie, aggiunta di un punto remoto); rete **IP**, appoggiando il protocollo KNX sul TCP/IP, utilizzato in grandi installazioni dove è necessaria una dorsale veloce o per mettere in comunicazione più edifici distanti tra loro.

	Rete	Trasmissione tramite	Aree applicative preferite
	Twisted Pair (doppino intrecciato)	Cavo di controllo separato	- Nuove installazioni - Ampie ristrutturazioni - Più alto livello di affidabilità di trasmissione
	RF (Radio Frequenza)	Linea radio	- Quando nessun cavo può essere installato
	IP	Ethernet/Wi-Fi	- In grandi installazioni dove è necessaria una dorsale veloce

Figura 18 Mezzi trasmissivi per KNX

Soffermandoci in particolare sulla soluzione classica, il doppino twistato, lo standard definisce quello che in gergo viene chiamato



Figura 19 Doppino twistato KNX

“cavo KNX”: è un cavo in PVC verde composto da due conduttori di sezione $0,80 \text{ mm}^2$, uno rosso e uno nero, intrecciati tra loro per ridurre l'incidenza di inquinamento elettromagnetico nella comunicazione, dotato di schermatura. Deve presentare una resistenza elettrica massima di massimo $29 \Omega/\text{km}$ per ciascun filo e capacità inferiore ai $100 \text{ nF}/\text{km}$, non necessita di terminazioni attive e può essere posato parallelamente ai cavi a 230V AC , preferibilmente in corrugati dedicati. Oltre al doppino, è standardizzato anche il connettore,

con 4 alloggi per collegamenti di altrettanti rami del bus, sagomatura anti-inversione dei poli, e colorazione rosso-nera per facilitare la connessione.



Figura 20
Connettore KNX

In un sistema KNX, il doppino è in grado di trasmettere sia i segnali sia la potenza. Opera ad una tensione di 30V DC, trasmettendo telegrammi alla frequenza di 9600 bit/s, composti da una sequenza di bit caratterizzati da livello logico “1” a 30V e “0” tramite brevi impulsi negativi a 21V.

La trasmissione sul bus avviene in maniera simmetrica nei due poli del cavo bus. Nessuno dei due poli è connesso a terra o a massa o ha una tensione costante. Il dispositivo bus valuta solo la differenza di potenziale AC tra i due fili. Se un disturbo irradiato si immette sul doppino, questo si trasmette con la stessa polarità e dunque non ha influenza sulla differenza di potenziale del segnale.

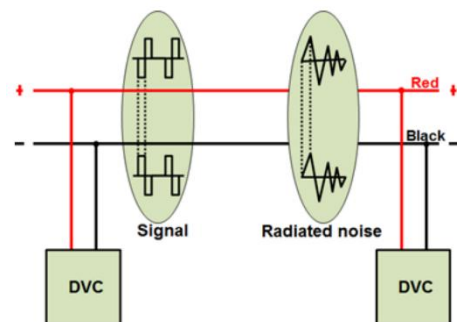


Figura 21 Esempio di un segnale in tensione KNX

I DISPOSITIVI

I dispositivi KNX sono composti principalmente da tre parti interconnesse:

- **unità di accoppiamento al bus (BCU)**, componente elettronico che ospita l'unità di trasmissione, responsabile della comunicazione sul BUS, e un microcontrollore con sistema operativo e software applicativo;
- **modulo applicativo (AM)**: che comprende l'elettronica necessaria ad espletare le specifiche funzioni del dispositivo (nel caso di attuatori, ad esempio, sarà composta da relè e circuiti di comando);
- **programma applicativo (AP)**: componente software che definisce il comportamento logico e funzionale del dispositivo.

Le unità di accoppiamento al bus e i moduli applicativi possono essere separati o inseriti in un unico involucro.

KNX è un sistema decentralizzato ad intelligenza distribuita: ogni dispositivo ha una sua intelligenza grazie al suo sistema operativo e una memoria di programma, ed è in grado di operare anche se sul sistema sono presenti dei malfunzionamenti. Questo implica che debba avere salvate al suo interno tutte le informazioni necessarie al suo corretto funzionamento. Nella memoria di un dispositivo saranno presenti:

- Il **software di sistema**: KNX e i suoi costruttori hanno standardizzato differenti versioni del software di sistema. Questi differenti profili software sono identificati da ETS per mezzo della "versione maschera": essa consiste di 2 byte e non può essere cambiata nel dispositivo.
- I **valori temporanei del sistema** (contenuti nella RAM) e della applicazione: Questi vengono persi in caso di caduta dell'alimentazione.
- Il **programma applicativo**, gli indirizzi individuali, gli indirizzi di gruppo o i parametri: questo sono usualmente memorizzati nella memoria riscrivibile.

Oltre ai classici dispositivi presenti in un sistema IoT, come sensori, attuatori e interfacce uomo-impianto, nei sistemi KNX sono presenti dispositivi specifici che permettono e/o facilitano la comunicazione:

- L'alimentatore KNX: in un sistema deve necessariamente essere presente almeno un alimentatore. Ha il compito principale di portare in tensione il BUS, stabilizzarlo a 30V DC e alimentare i vari dispositivi collegati; tuttavia, non può essere un alimentatore 30VDC qualsiasi in quanto svolge anche una funzione attiva nella comunicazione: genera una semionda positiva complementare a quella inviata dai dispositivi per la comunicazione, potendo distinguere in questo modo il segnale da eventuale rumore di fondo.
- Gli accoppiatori: sono dispositivi con doppia connessione al BUS, e in base alla loro posizione nell'impianto e alla loro configurazione possono agire come accoppiatori di area e linea, generando nuove aree/linee collegate al resto del sistema, o *line extender*, per collegare due segmenti della stessa linea (ogni segmento può ospitare un massimo di 64 dispositivi). Oltre a mettere in comunicazione segmenti, linee e aree, questi dispositivi isolano galvanicamente le due porzioni di sistema che collegano e generano automaticamente delle tabelle filtro che bloccano il passaggio di tutti quei segnali che non debbano raggiungere le altre porzioni di impianto, evitando inutili congestioni sul BUS.

Passando alle logiche di comunicazione, i concetti chiave del protocollo KNX sono: indirizzo fisico, indirizzo di gruppo, oggetto di gruppo e telegramma.

L'**indirizzo fisico** (o individuale) è l'indirizzo che identifica univocamente un dispositivo all'interno di un sistema KNX. Viene assegnato al dispositivo la prima volta che viene contattato per la sua programmazione previa pressione del pulsante di programmazione ed

ha la funzione principale di consentire il trasferimento dei “telegrammi di programmazione”. Nella comunicazione a regime può assumere il ruolo di indirizzo di origine di una comunicazione.

Viene rappresentato come una sequenza di 3 numeri separati dal punto (A.L.D) e ha una struttura a 16 bit, dove i primi 4

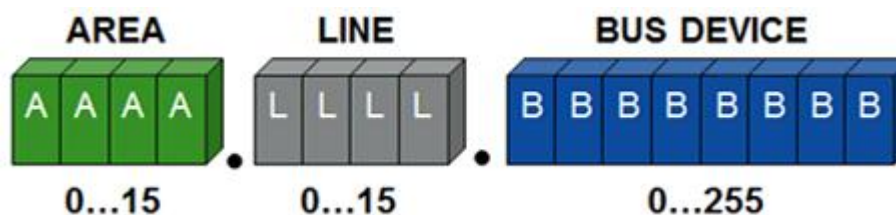


Figura 22 Indirizzo fisico KNX

sono dedicati alla definizione dell'area (da 0 a 15), i successivi 4 alla definizione della linea all'interno dell'area (da 0 a 15) e infine 8 bit (da 0 a 255) identificano il singolo dispositivo all'interno della linea.

L'indirizzo fisico prende il suo nome dalla caratteristica di rispecchiare fisicamente la posizione del dispositivo all'interno dell'architettura dell'impianto (area.linea.dispositivo).

L'**indirizzo di gruppo** invece ha una funzione più logica e assume un ruolo centrale durante la comunicazione tra dispositivi. Può essere visto come l'indirizzo di destinazione di un telegramma: in fase di programmazione, ad ogni comunicazione viene assegnato un indirizzo di gruppo, e le singole entità coinvolte in tale comunicazione vengono associate a quest'indirizzo. Può essere visto come la singola chat in un'applicazione di messaggistica: ogni utente (dispositivo) invia un messaggio (telegramma) nella chat (indirizzo di gruppo) condivisa con gli utenti interessati a quella informazione. Un telegramma inviato in un indirizzo di gruppo sarà letto solo dalle entità (oggetti di gruppo) associati a quell'indirizzo.

Viene rappresentato come una sequenza di 3 numeri separati dal carattere “/” (slash) e anch'esso ha una struttura a 16 bit che può essere libera o organizzata su due o tre livelli, lasciando libero il progettista di scegliere se, quanti e come organizzare in livelli il suo progetto. La struttura solitamente più utilizzata è in ogni caso

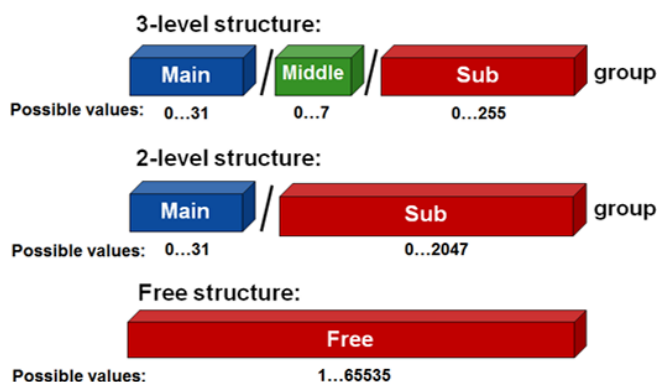


Figura 23 Possibili strutture per gli indirizzi di gruppo

quella a tre livelli, che permette di ottenere un progetto più ordinato e consultabile. Nella struttura a tre livelli 5 bit vengono dedicati al livello principale (da 0 a 31), 3 bit al livello intermedio (da 0 a 7) e 8 bit (da 0 a 255) per il livello finale. In ogni caso, l'indirizzo 0 (0, 0/0

o 0/0/0) non può essere utilizzato in quanto dedicato alle comunicazioni broadcast (per i telegrammi di programmazione).

Come detto, ogni indirizzo di gruppo viene associato alle “entità” coinvolte in una comunicazione, queste entità vengono definite **oggetti di gruppo o di comunicazione**. Ogni dispositivo possiede solitamente un gran numero di oggetti di gruppo, ognuno dedicato ad un aspetto di una funzione: ad esempio, un attuatore luci a due canali avrà sicuramente almeno due oggetti di comunicazione per il comando on/off dei due canali e molto spesso anche due per l'invio dei rispettivi messaggi di feedback. Un oggetto di comunicazione può essere esposto dal dispositivo sia per l'invio che per la ricezione di determinato dato, ed è caratterizzato da un determinato tipo di dato (datapoint) scelto tra quelli messi a disposizione dal protocollo (On/Off, /Su/Giù, 30%, 35.3, ecc). tendenzialmente è buona norma non modificare né il verso di comunicazione né il tipo di dato associato ad un indirizzo di gruppo tuttavia, tramite ETS, è possibile farlo al fine di risolvere problematiche di comunicazione in casi particolari.

Quando si verifica un **evento**, (ad esempio, quando viene premuto un pulsante o viene rilevato un movimento, ecc.), il dispositivo bus invierà un **telegramma sul bus**. Dato che ogni dispositivo si aspetta, dopo aver inviato un telegramma, di ricevere un messaggio di conferma (Ack), la trasmissione del telegramma inizierà subito dopo che il bus è rimasto inoccupato per almeno per un breve periodo di tempo.

I dispositivi comunicano sul bus attraverso i **telegrammi**, formattati in modo tale da garantire una comunicazione snella ed efficace. Un telegramma KNX è formato da diversi campi:

- campo di controllo: 1 byte, utile al rilevamento di errori di trasmissione
- indirizzo sorgente: 2 byte, contiene l'indirizzo fisico del dispositivo che invia il telegramma
- indirizzo di destinazione: 2 byte +1, contiene l'indirizzo di gruppo dove l'informazione viene inviata
- contatore di routing: 3 bit, contiene un numero intero che viene decrementato ogni volta che il messaggio attraversa lo stesso dispositivo di sistema, evitando così che un messaggio possa transitare all'infinito sul BUS
- lunghezza: 4 bit, che comunicano la lunghezza dei dati utili inviati
- Payload (dati utili): il messaggio vero e proprio contenente l'informazione da trasmettere

- byte di controllo per un ulteriore rilevamento di errori.

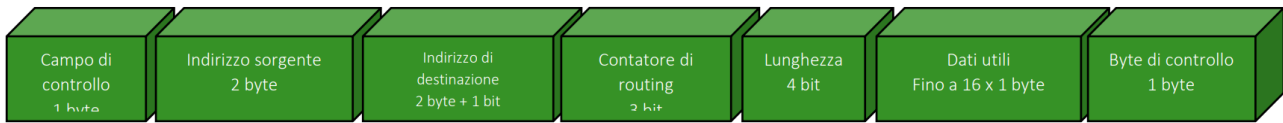


Figura 24 Il telegramma KNX

Quando si verifica un **evento**, (ad esempio, viene premuto un pulsante o viene rilevato un movimento, ecc.), un dispositivo invierà un **telegramma sul bus**. Dato che ogni dispositivo si aspetta, dopo aver inviato un telegramma, di ricevere un messaggio di conferma (Ack), la trasmissione del telegramma inizierà subito dopo che il bus è rimasto inoccupato per almeno per un breve periodo di tempo.

Dal punto di vista della struttura topologica di un sistema KNX, come suggerisce la struttura degli indirizzi fisici è organizzata in aree e linee, consentendo la realizzazione di sistemi espandibili con modularità, adattandosi a installazioni di ogni dimensione.

Il sistema minimo è quello costituito da un singolo alimentatore che genera un'unica linea dove vengono collegati un dispositivo di input (come un sensore o un semplice pulsante) e un attuatore. Per installazioni di dimensioni ridotte come piccoli appartamenti questa configurazione può ancora essere utilizzata, avendo come limite un numero massimo di 64 dispositivi collegati.

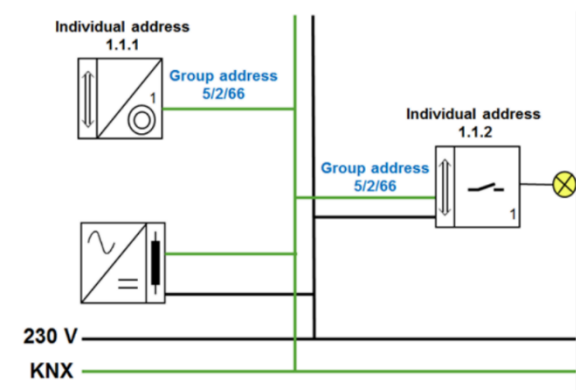


Figura 25 Sistema minimo KNX

Le tipologie strutturali ammesse sono molteplici:

- **lineare**, tipica di ambienti che si sviluppano principalmente in un'unica direzione come i corridoi. Il doppino percorre l'ambiente allacciandosi ai dispositivi con il collegamento chiamato in gergo "entra-esci", quindi con i dispositivi in parallelo sul bus;
- **a stella**: il doppino parte con diramazioni radiali da un punto centrale, ad esempio l'alimentatore stesso;
- **ad albero**: una combinazione delle precedenti nella quale il doppino può percorrere tratti lineari diramandosi a stella a ridossi di dispositivi situati in posizioni strategiche.

L'unica struttura non ammessa è quella ad anello o a loop, in quanto potrebbe portare alla circolazione anomala dei telegrammi sul BUS.

Superato il limite di 64 dispositivi è possibile estendere la stessa linea aggiungendo altri segmenti, o aggiungere nuove linee, inserendo nel sistema un alimentatore per ogni nuovo segmento o linea e un BUS coupler utilizzato rispettivamente come accoppiatore di segmento o di linea, fino a un massimo di 16 linee e 4 segmenti per linea. Potendo scegliere, l'aggiunta di una linea è preferibile in quanto permette successive espansioni in ogni punto dell'impianto, potendo ampliare le linee stesse. In presenza di più linee una di queste assumerà il ruolo di linea principale, dalla quale saranno derivate tutte le altre tramite accoppiatori. È da sottolineare come gli stessi accoppiatori rappresentino dei dispositivi e vanno dunque conteggiati nei 64 massimi per la linea principale.

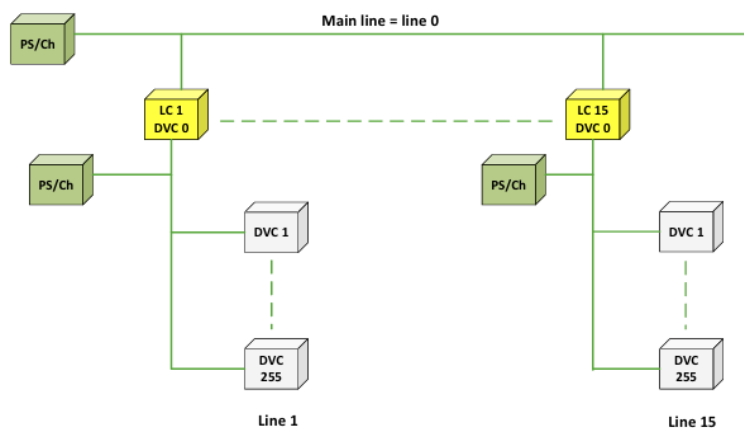


Figura 26 Architettura KNX multilinea

Per installazioni di grandi dimensioni spesso 16 linee non sono sufficienti o si desidera comunque mantenere dei margini per future espansioni del sistema. In questi casi è possibile aumentare il numero di aree: una linea (ad esempio la 0.0.-) verrà usata come backbone, da questa vengono derivate le varie aree tramite Bus Coupler e, successivamente, dalla linea principale di ogni area verranno derivate nuove linee.

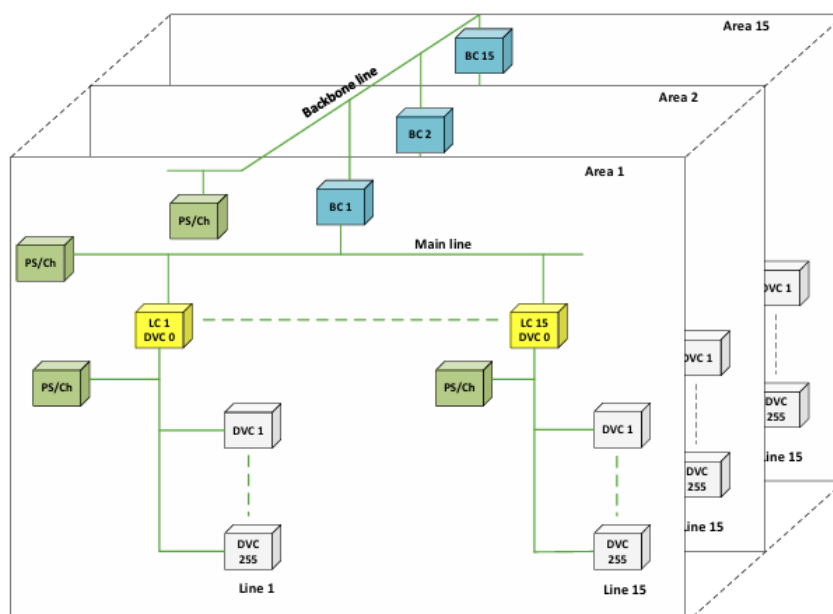


Figura 27 Architettura KNX multi-area

La standardizzazione dell'alimentatore, del cavo e di tutti i dispositivi integrabili permette di fissare dei limiti ben precisi sulle distanze oltre che sul numero di dispositivi. In particolare, i limiti imposti dallo standard sono i seguenti:

- distanza massima di un dispositivo dall'alimentatore: 350m
- distanza massima tra due dispositivi: 700m
- lunghezza massima totale di una linea: 1000m

La backbone può anche essere realizzata in KNX IP anziché TP, consentendo l'integrazione in un unico sistema di più edifici anche distanti, collegati tra loro tramite collegamento IP.

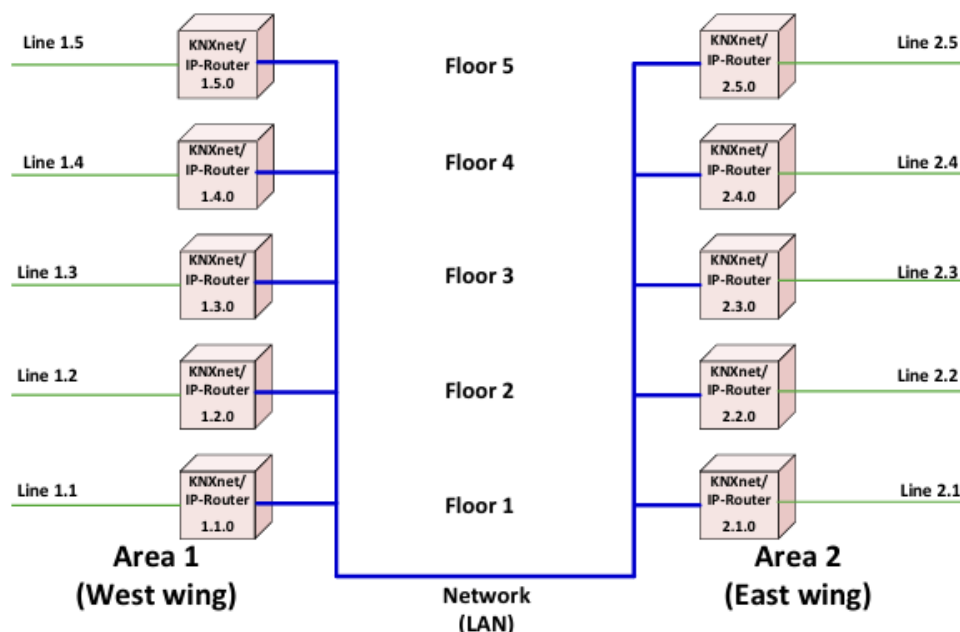


Figura 28 Architettura KNX con backbone IP

Spesso, come visto anche nel paragrafo sulla building automation, sotto al BUS KNX possono essere integrati altri protocolli utilizzando dei Gateway. Un esempio classico è quello delle isole DALI integrate in un sistema KNX.

La domotica di nuova generazione

Grazie al forte sviluppo nel settore dell'IoT, dell'elettronica di consumo e dell'aumento di interesse da parte delle grandi aziende dell'IT al mondo dei Big Data, nel corso dell'ultimo decennio la domotica ha vissuto una fase di grande fermento che continua tutt'ora. Da tecnologia di nicchia, riservata a edifici di prestigio, declinata in impianti cablati complessi e costosi, si è progressivamente evoluta in una soluzione economicamente accessibile modulare e di semplice installazione (in alcuni casi plug-and-play), adatta quindi anche ai contesti residenziali comuni. Ci si è trovati infatti di fronte alla diffusione di un numero

sempre maggiore di dispositivi smart, facili da installare e configurare, spesso controllabili da smartphone e/o integrabili in ecosistemi più ampi. Parallelamente, si è assistito a una moltiplicazione dei protocolli, delle piattaforme e degli standard, che se da un lato ha aumentato le possibilità, dall'altro ha introdotto una certa frammentazione e confusione per l'utente finale.

Cercando di fare un po' di ordine, si possono classificare le soluzioni a disposizione in 4 grandi filoni:

1. **Dispositivi stand-alone.** Questi sono i dispositivi più semplici e diffusi, come lampadine intelligenti, prese smart o piccoli sensori ambientali. Sono pensati per funzionare singolarmente, senza la necessità di un'infrastruttura complessa. Di solito si connettono tramite Wi-Fi o Bluetooth e sono gestibili in cloud tramite un'app proprietaria. Sebbene siano facili da usare, presentano forti limitazioni in termini di automazione e integrazione con altri sistemi, quindi non si aggiungerà altro al riguardo.
2. **Smart devicecs integrabili.** Vengono prodotti da aziende piccolo-medie, spesso neonate o aziende specializzate in settori specifici che decidono di aprirsi al mondo dell'IoT. Anche in questo caso si parla di prodotti economici comunicanti principalmente con WiFi, Bluetooth, Zigbee o più recentemente Matter. Per quanto esista spesso un'app associata ad ogni marchi, il loro utilizzo più performante è integrati all'interno di sistemi più ampi, potendo in questo modo collaborare con altre tipologie di smart device e sfruttare app e sistemi più elaborati e avanzati, delegando in alcuni casi all'app del brand la sola configurazione iniziale.

Tra i marchi più affermati di questa categoria si cita la diffusissima Shelly che produce dispositivi per la gestione dell'illuminazione e del controllo carichi, meter per il monitoraggio dei consumi elettrici e sensoristica ambientale, o le più economiche Sonoff e Moes.

3. **Linee di prodotti smart integrabili.** i grandi produttori di componenti per gli impianti elettrici o più in generale di prodotti per la casa si sono adeguati alle richieste del mercato offrendo intere linee di prodotti connessi. Trattandosi di linee di prodotti in questo caso si tende a puntare di più sull'utilizzo dell'app abbinata per la gestione della casa, in particolare nel caso di installazioni in edifici di nuova costruzione o soggetti ad una profonda ristrutturazione, tuttavia, complice la necessità di interfacciarsi con gli assistenti vocali ormai molto diffusi, viene offerta nella quasi totalità dei casi la possibilità di integrazione in sistemi terzi attraverso bridge o

gateway. Alcuni esempi di queste soluzioni posso essere rappresentati dalla linea “View” della Vimar, la “Home+ control” della Bticino (Legrand) o la famosa linea “Philips Hue” per gli impianti di illuminazione.

- 4. Ecosistemi e Hub.** In un contesto così caotico e articolato, da un lato hanno trovato grande spazio i big del settore IT, che hanno cercato di fornire una loro interpretazione della domotica in chiave moderna, dall'altro sono nati progetti open source e non, di hub molto promettenti e in alcuni casi già affermati sul mercato. Partendo dai Big Tech, Apple e Samsung si sono mosse verso la creazione di ecosistemi aperti nei quali è possibile integrare dispositivi smart di diversi produttori, commercializzando Hub di domotica o trasformandoci i loro prodotti per la casa (frigoriferi o smart TV), mentre Amazon e Google hanno optato per la strada degli assistenti vocali, sotto ai quali è possibile anche in questo caso integrare dispositivi terzi e gli stessi ecosistemi Apple e Samsung. Il risultato è simile anche se con qualche differenza: un unico ambiente digitale dove gestire la propria smart home, con grafiche minimali e intuitive, facilità nell'integrazione di nuovi dispositivi e servizi e nella creazione di automazioni ma con la limitazione di una bassa adattabilità e funzionalmente poco ricco, con una forte componente cloud. Gli hub indipendenti invece sono caratterizzati da una maggior complessità, rivolti più verso utenti con una certa dimestichezza informatica (per una domotica fai-da-te) o verso system integrator (per una domotica di sistema). Negli anni si è comunque cercato di perfezionarsi verso una domotica più plug-and-play, ma le elevate prestazioni che li differenziano dalle soluzioni dei big posso essere raggiunte solo tramite competenze superiori alla media. Gli hub indipendenti sfruttano solitamente il più possibile risorse locali, prestando grande cura al trattamento dei dati e alla riservatezza.

Home Assistant

Questa sezione è dedicata interamente ad Home Assistant, in quanto è stato ampiamente utilizzato in svariate applicazioni anche sperimentali, grazie alla sua versatilità e alle possibilità di customizzazione profonde che mette a disposizione.

Home Assistant è un software Open Source gratuito di sviluppo relativamente recente e in continua evoluzione grazie ad una community di esperti ed appassionati del settore estremamente attiva. È considerato da molti l'HUB personale per la domotica per eccellenza, la migliore soluzione nella sua categoria.



Figura 29 Logo Home Assistant

Il progetto nasce da un'idea di Paul Schoutsen nel settembre 2013 ed è stato pubblicato per la prima volta su GitHub nel novembre dello stesso anno. Da quel momento si è evoluto sempre più attirando l'attenzione di molti utenti e sviluppatori che, formando una community, l'hanno portato nel luglio 2017 al rilascio di una pratica versione sottoforma di sistema operativo, sino ad arrivare, a gennaio 2021, al lancio della sua prima versione stabile.

Lo scopo di Home Assistant all'interno di un sistema domotico è quello di uniformare e armonizzare ogni componente indipendentemente dal tipo di tecnologia e dalla casa produttrice, rendendo questi interoperabili e automatizzabili. Crea quindi un unico ambiente all'interno del quale è possibile integrare qualsiasi tipo di dispositivo delle marche più disparate consentendo l'interazione tra essi. Consente inoltre di creare automazioni e script più o meno complessi, di definire scene, aree e gruppi, nonché di definire utenti con diversi permessi di accesso al sistema. La sua integrabilità è massima: tramite le integrazioni (descritte in seguito) può supportare tutti i principali protocolli di comunicazione tra cui WiFi, Bluetooth, MQTT, ZigBee, Matter, KNX, Modbus ecc. purché si disponga delle relative antenne o di gateway adeguati [31].

Oltre all'eccezionale integrabilità, un altro punto di forza di questo software è la filosofia alla base della gestione dei dati personali. La comunicazione con i dispositivi installati viene effettuata sulla rete locale a meno che i dispositivi non prevedano una comunicazione esclusivamente tramite cloud, e in tal caso l'utente viene informato di ciò. Anche lo stoccaggio dei dati è effettuato su un database locale contenuto in un hard disk o una scheda di memoria SD. L'unico momento di vulnerabilità si ha nella connessione da remoto al sistema, che può comunque avvenire appoggiandosi a servizi di DNS dinamico o di VPN. Viene installato su computer, NUC o single board computer (e.g Raspberry PI da 3B+ in poi) e mette a disposizione principalmente due versioni:

- Home Assistant Core: è la versione nuda e cruda dell'HUB; ha i vantaggi di essere molto leggera e di non dovervi dedicare in maniera esclusiva la macchina su cui è installato, ma paga tutto ciò con delle più complesse e articolate modalità di configurazione e perfezionamento. Viene solitamente installato all'interno di docker container su sistemi operativi Linux.
- Home Assistant Operating System (OS): è la versione più user-friendly e supera lo svantaggio di dover dedicare a sé l'intera macchina su cui è installato con l'introduzione degli Add-on: software aggiuntivi installabili come

container Docker. È presente una sorta di shop (gratuito) che mette a disposizione un gran numero di applicazioni a supporto all'HUB utili ad estenderne le funzionalità, quali ad esempio NodeRed, Mosquitto, InfluxDB, Grafana, ecc.

Sono anche disponibili sul mercato soluzioni preconfigurate, adatte a utenti meno esperti, come Home Assistant Yellow, Green e Blue.



Figura 30 home Assistant Blue

Per quanto riguarda l'architettura software, prendendo in considerazione la soluzione Core installata come docker container in quanto quella utilizzata in tutte le applicazioni descritte in seguito, è composto principalmente da 4 componenti:

- Event Bus. il cuore pulsante di Home Assistant, essendo questo una piattaforma event-based. Qualsiasi cosa accade all'interno del sistema viene annunciata e tracciata all'interno di questa sezione.
- State Machine. invece tiene traccia di tutti gli stati delle varie entità presenti nel sistema e comunica un evento "state_changed" ogni qualvolta un componente cambi il suo stato.
- Service Registry. gestisce tutti i servizi (ossia le richieste di azione), è in ascolto sul Bus degli eventi per eventuali eventi call_service e invia gli eventi service_called.
- Timer: gestisce il tempo inviando al bus un evento time_chanced ogni secondo.

Dal punto di vista logico, l'elemento base in Home Assistant sono le entità: oggetti astratti che rappresentano ogni tipo di elemento presente nel sistema. Ogni entità è dotata di una propria natura, di uno stato e di vari attributi e ad esse possono essere collegati più servizi. La natura di un'entità ne definisce la tipologia e deriva dal tipo di componente a cui fa capo. Alcuni esempi di natura di un'entità sono:

- sensor
- binary sensor
- switch
- Light
- Climate
- Cover

Vengono trattate come entità anche le automazioni, gli script, gli stessi gruppi di entità, le scene, le zone e molto altro, e quindi anche questi rappresenteranno una natura.

In base alla natura dell'entità vi saranno associati dunque stati e attributi. Ad esempio, un'entità di natura "sensor" avrà uno stato che sarà rappresentato dal valore numerico che il sensore sta misurando, mentre potrà presentare come attributi un "friendly_name", un "icon" (presenti per entità di qualsiasi natura) e un "Unit_of_measurement".

I servizi invece rappresentano dei comandi che il sistema può impartire all'entità e dipendono anch'essi dalla natura. Mentre un sensore non ha servizi collegati, uno switch presenterà come stato un semplice valore booleano ON/OFF, come attributi i classici "friendly_name" e "icon", e ad esso potranno essere collegati i servizi "turn_on", "turn_off" o "toggle" (accendi, spegni, o cambia stato).

Ad un livello superiore troviamo le integrazioni: componenti software che permettono appunto di integrare nell'ambiente di Home Assistant tutti i dispositivi e i servizi presenti nelle abitazioni. Queste possono essere native, ossia già presenti nell'HUB oppure vanno aggiunte come componenti custom messi a disposizione da altri utenti. Per dare un'idea delle infinite possibilità di integrazione che vanta Home Assistant si noti che si possono contare oltre 2500 integrazioni solo tra quelle native.

Per quanto riguarda gli aspetti legati alle possibilità di automazione Home Assistant mette a disposizione 3 elementi: Le automazioni, gli script e le scene. La creazione di automazioni è uno dei punti di forza di home assistant in quanto possono essere create con procedure molto semplici tramite interfaccia grafica, ma offrono anche la possibilità di svolgere funzioni avanzate e complesse tramite la scrittura in codice yaml e l'integrazione di templating in codice Jinja2. Gli elementi di base per definire un'automazione in Home Assistant sono:

- i Trigger. rappresentano l'innescò dell'automazione, gli eventi che devono verificarsi affinché l'automazione sia avviata. Solitamente identificano il cambiamento di stato di un'entità o di un suo attributo ed è possibile precisare se si passi da uno stato specifico ad un altro, da un qualsiasi stato ad uno specifico o viceversa o impostare un periodo in cui una determinata entità si trovi uno stato. Per ogni automazione posso essere definiti più trigger che verranno gestiti secondo una logica "OR".
- le Condition. condizioni per l'appunto che se non verificate interrompono l'esecuzione dell'automazione. la principale differenza rispetto ai trigger, oltre all'aspetto funzionale, è che in questo caso si ha a che fare con stati invece che con eventi; inoltre, le condizioni posso essere collegate tra loro seguendo

sia una logica OR sia una logica AND, rendendo la configurazione molto versatile.

- le Action. una o più azioni che il sistema dovrà svolgere. Qui andranno definiti dei servizi da chiamare e le entità a cui faranno riferimento. Le azioni definite in questo campo potranno essere anche delle attese inserendo il campo delay e verranno eseguite in successione seguendo l'ordine in cui sono state inserite. È inoltre possibile specificare ulteriori "condition" al fine di far eseguire azioni diverse in base allo stato in cui determinate entità si trovino.

Per ogni automazione deve essere anche definita la modalità di esecuzione al fine di gestire attivazioni multiple: single, a seguito di un'attivazione multipla l'automazione viene eseguita una sola volta; restart, alla seconda attivazione l'automazione ricomincia; queued, la seconda attivazione mette in coda un'altra esecuzione; parallel, la seconda automazione viene eseguita contemporaneamente allo svolgersi della prima.

Gli script invece sono uno strumento spesso a servizio delle automazioni. Rappresentano una sequenza di azioni eseguita con un ordine prestabilito, con possibilità di inserimento di blocchi delay, wait (che attendono un determinato evento per proseguire), condizioni, selettori (per eseguire diverse azioni in differenti condizioni) e molto altro. Possono essere utilizzati all'interno di automazioni per semplificarne la scrittura o attivati da pulsanti tramite interfaccia grafica.

Altri strumenti a disposizione per gestire gli algoritmi automativi sono:

- i Blueprint, automazioni preconfigurate che necessitano il solo inserimento delle entità coinvolte
- i gruppi, insiemi di entità omogenee che assumono lo stato dei loro elementi (es. on se almeno un'elemento è on, off se sono tutti off), utilizzati per controllare più entità con un solo comando
- le zone, entità che definiscono una specifica area sulla mappa tramite latitudine longitudine raggio, e vengono utilizzate come stati per le entità "device_tracker". Risultano molto utili per stabilire trigger di automazioni e per evitare di esporre la posizione esatta dello smartphone sul sistema (viene esposta solo l'eventuale presenza nella zona)
- le scene, definiscono lo stato di un gruppo di entità e possono essere richiamate per riportare tutte le entità al loro interno in quello stato.

Home Assistant ha sviluppato anche un'app, "Home Assistant Companion", disponibile sia per Android che per IOS, che oltre a permettere un agevole accesso alle istanze, consente di esporre numerosi sensori dello smartphone sul sistema, come in primis la localizzazione GPS, ma anche le modalità d'uso del telefono, dettagli sulle connessioni WiFi e/o Bluetooth, il sensore NFC, livelli di batteria, se lo smartphone è in ricarica o no, ecc, molto utili in fase di realizzazione di automazioni. Consente inoltre di inviare notifiche push sul dispositivo.

L'ultimo aspetto degno di nota riguardo Home Assistant è l'interfaccia grafica. È organizzata in dashboard, viste, sezioni e card. Le card sono il tassello minimo, possono essere organizzate in sezione e consentono di inserire svariati elementi all'interno di una schermata (vista). Le card a disposizione nativamente sono già tantissime, e il numero aumenta se vengono prese in considerazione anche quelle custom realizzate dagli utenti. Descrivere tutte le opzioni a disposizione è impossibile, ma la possibilità di realizzare custom card utilizzando i classici strumenti del web front-end (JavaScript, html, CSS) dimostra di per sé che è possibile personalizzare la user experience a proprio piacimento. Più card, organizzate in sezioni o meno, vengono inglobate in una vista e diverse viste insieme compongono una dashboard. Ogni elemento può essere reso visibile o meno a seconda dell'utente o di condizioni specifiche delle entità.

2.2 Digital Twin

2.2.1 Modellazione in ambiente BIM

Il Building Information Modeling (BIM) rappresenta uno dei cambiamenti più significativi avvenuti negli ultimi decenni nel settore delle costruzioni e della produzione. Con BIM si intende un insieme di processi, metodologie e tecnologie digitali che consentono la creazione, l'utilizzo e la gestione di modelli tridimensionali intelligenti arricchiti da dati informativi strutturati. Questi modelli non sono semplici rappresentazioni geometriche, come accade nei software CAD tradizionali, ma modelli digitali informativi in grado di descrivere in modo coerente e interoperabile ogni elemento fisico, funzionale ed economico dell'opera.

Il BIM si pone come obiettivo la gestione integrata e collaborativa dell'intero ciclo di vita di un'opera edilizia o infrastrutturale: dalla fase di ideazione, progettazione e costruzione, fino all'esercizio, manutenzione e, infine, dismissione. In tal senso, è corretto parlare di BIM come modello, BIM come processo e BIM come approccio metodologico:

- **BIM come modello:** rappresenta il modello digitale vero e proprio, costituito da oggetti parametrici che contengono non solo informazioni geometriche ma anche dati

relativi ai materiali, ai costi, alla manutenzione, alle prestazioni energetiche, alla posizione spaziale, ecc.

- **BIM come processo:** riguarda la gestione delle informazioni e dei flussi di lavoro tra i vari attori coinvolti, attraverso un ambiente collaborativo. Il BIM impone una struttura di processo che consente di pianificare, costruire e monitorare le fasi di progetto in modo trasparente e tracciabile.
- **BIM come metodologia:** introduce un cambiamento culturale e organizzativo nel settore delle costruzioni, che rompe con la frammentazione disciplinare tipica della progettazione tradizionale. L'adozione del BIM richiede infatti la ridefinizione di ruoli, responsabilità, competenze e strumenti.

Il BIM, infatti, non è una semplice tecnologia, ma una trasformazione del modo di operare dell'intero settore AEC (Architecture, Engineering, Construction), orientata alla digitalizzazione, all'efficienza e alla trasparenza dei processi.

Attraverso l'uso di software specifici, standard condivisi e ambienti comuni di dati (CDE), il BIM permette a progettisti, ingegneri e costruttori di lavorare simultaneamente e in modo coordinato, contribuendo a ridurre errori, costi e tempi di realizzazione. Il modello BIM diventa quindi un contenitore informativo multidisciplinare, abilitante per le logiche di progettazione integrata, simulazione delle prestazioni (ad esempio energetiche), manutenzione predittiva e gestione intelligente degli edifici.

Per garantire la coerenza e l'interoperabilità tra i diversi attori e software, il BIM fa ampio uso di **standard aperti** di ambienti comuni di dati (CDE, *Common Data Environment*), che centralizzano tutte le informazioni in un unico spazio condiviso e accessibile, evitando duplicazioni e perdite di dati.

Dal punto di vista operativo, il BIM consente un'efficace **integrazione interdisciplinare** tra architettura, ingegneria strutturale, impiantistica e gestione dell'edificio. I professionisti possono collaborare in modo sinergico attraverso piattaforme BIM-oriented, evitando sovrapposizioni progettuali, incompatibilità e rilavorazioni. In questo senso, il BIM rappresenta un **punto di convergenza tra progettazione integrata, simulazione digitale e gestione intelligente degli edifici**, ponendo le basi per l'implementazione di approcci avanzati come il **Digital Twin** e l'integrazione con sistemi IoT e di Building Management.

Storia del BIM

Il concetto di Building Information Modeling (BIM) nasce negli anni '70, come risposta alle crescenti esigenze della progettazione architettonica e ingegneristica che non potevano più essere soddisfatte dai tradizionali sistemi CAD (Computer-Aided Design). Già nel 1975, Charles Eastman descriveva nel suo articolo il Building Description System (BDS), un sistema capace di rappresentazioni 3D computabili, progettazione parametrica e gestione di un database unificato contenente attributi come materiali, fornitori e proprietà geometriche. Il BDS può essere considerato uno dei primi embrioni del concetto moderno di BIM, poiché anticipava l'idea di un modello integrato e informativo dell'edificio [32] [33].

Negli anni successivi, Eastman sviluppò GLIDE (Graphical Language for Interactive Design), una piattaforma che già mostrava molte delle caratteristiche dei moderni software BIM. Durante gli anni '80, il settore iniziò a vedere lo sviluppo di sistemi sempre più avanzati, culminando nel 1987 con il rilascio di ArchiCAD, il primo software BIM disponibile su computer personali. Quasi contemporaneamente, Tekla lanciò un proprio sistema basato sull'integrazione tra grafica e database relazionali. Questi strumenti si differenziavano dai software CAD tradizionali poiché non si limitavano alla rappresentazione geometrica, ma consentivano l'integrazione di informazioni aggiuntive come tempi, costi, sostenibilità e manutenzione.

Il termine "Building Information Modeling", nel senso attuale, cominciò a diffondersi solo negli anni '90, pur essendo stato utilizzato in contesti accademici già a metà degli anni '80. In questo periodo, il settore dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni (AEC) iniziò ad adottare con maggiore convinzione strumenti digitali per la progettazione integrata. Software come il Building Design Advisor (1993) e soluzioni innovative per il rilievo digitale (come Mapsoft, fondata in Australia nel 1994) ampliarono ulteriormente le capacità del BIM, portando questi strumenti anche sul campo, grazie alla crescente potenza di calcolo dei dispositivi mobili.

Un punto di svolta fu il lancio, nel 2000, di Revit, sviluppato da Charles River Software. Questo software introdusse il concetto di "motore di cambio parametrico", permettendo la gestione simultanea di geometria, dati e attributi temporali in un unico ambiente, segnando un passaggio cruciale verso la piena integrazione del ciclo di vita edilizio.

Con la diffusione di molteplici soluzioni BIM proprietarie, emerse un problema critico: la mancanza di interoperabilità tra piattaforme diverse. Questo ostacolava la collaborazione tra attori e la condivisione dei dati lungo l'intero processo edilizio. Per risolvere tali

problematiche, a partire dagli anni 2000 si affermarono standard aperti come l'Industry Foundation Classes (IFC) e iniziative normative come il CIMSteel Integration Standard (CIS/2), sviluppato per il settore delle strutture in acciaio. Questi standard permisero il dialogo tra software e promuovevano una visione collaborativa, coerente con le intuizioni originarie di Eastman [34].

Oggi, il BIM rappresenta un paradigma consolidato nella digitalizzazione delle costruzioni, supportato da normative nazionali e internazionali, e si configura sempre più come una piattaforma di riferimento per la gestione intelligente dell'intero ciclo di vita dell'edificio, dalla progettazione alla demolizione.

L'interoperabilità

Uno degli aspetti fondamentali del Building Information Modeling è la collaborazione tra discipline e attori diversi durante tutto il ciclo di vita dell'edificio, dalla progettazione alla costruzione, fino alla gestione e manutenzione. Tuttavia, questa collaborazione è messa a dura prova dalla presenza di strumenti software differenti, spesso sviluppati da aziende concorrenti e basati su formati proprietari.

Nell'ottica della condivisione dei dati, l'efficace scambio di informazioni tra le figure professionali coinvolte si definisce **interoperabilità**. Questa caratteristica, propria della gestione mediante approccio BIM, risulta determinante ai fini della buona riuscita di un progetto. Il modello digitale diventa, a tutti gli effetti, un **database condiviso**, accessibile e modificabile da parte di tutti i professionisti coinvolti. Le modifiche apportate da ciascun attore vengono recepite e propagate automaticamente al resto del modello, aggiornando tutte le sue componenti in tempo reale e **facilitando il coordinamento interdisciplinare**.

Il concetto di interoperabilità si articola in due livelli:

- **Interoperabilità di primo livello:** si realizza all'interno di un ecosistema software sviluppato da una singola casa produttrice, dove gli strumenti dialogano nativamente tra loro (es. Revit e Navisworks, entrambi di Autodesk).
- **Interoperabilità di secondo livello:** si instaura tra strumenti e piattaforme di differenti produttori, e costituisce il vero obiettivo dell'approccio openBIM. Consente una collaborazione aperta, senza alcun vincolo imposto dai formati proprietari, rendendo possibile la cooperazione tra differenti software specialistici (es. importazione di un modello architettonico in un software per analisi energetica o strutturale).

La centralizzazione dei dati in un unico ambiente digitale consente di superare il tradizionale scambio di elaborati 2D tra specialisti, tipico della metodologia convenzionale. Nella logica BIM, il modello digitale rappresenta l'unico canale di condivisione e ogni componente del team può accedere alla versione più aggiornata del progetto, evitando errori, ridondanze, sovrapposizioni e rilavorazioni.

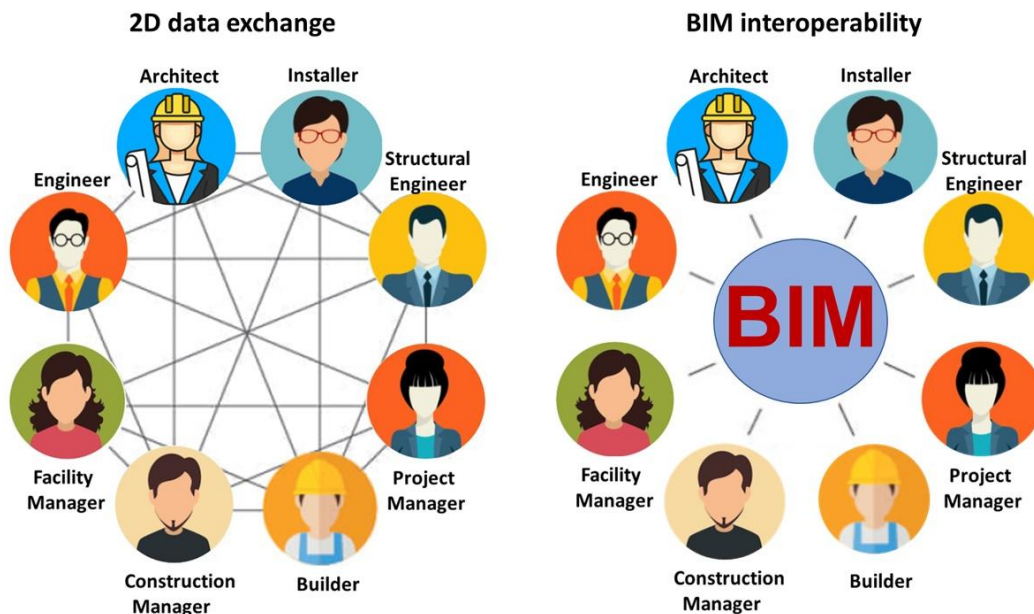


Figura 31 confronto preprogettazione tradizionale e metodologia BIM

A rendere possibile questa condivisione strutturata e sicura, interviene il concetto di CDE – Common Data Environment, ovvero l'ambiente comune di condivisione dei dati. Il CDE è una piattaforma digitale centralizzata dove vengono raccolti, organizzati e aggiornati tutti i documenti, i modelli e le informazioni di progetto. Attraverso strumenti di controllo delle versioni, gestione dei permessi e workflow approvativi, il CDE garantisce:

- la trasparenza informativa tra i partecipanti;
- la tracciabilità delle modifiche e delle responsabilità;
- la coerenza dei dati lungo tutte le fasi di progetto;
- l'accesso differenziato in base ai ruoli professionali.

Una struttura così articolata e con obiettivi così elevati rende necessaria la nascita di nuove figure professionali, strettamente legate a questo nuovo flusso progettuale e con competenze specifiche. Si possono distinguere principalmente tre nuove figure:

- **BIM Specialist:** è la figura operativa responsabile della creazione e gestione dei modelli specifici per ogni disciplina. Deve avere competenze sulla modellazione 3D, la gestione dei dati, l'utilizzo corretto di template, famiglie e standard nel rispetto dei

requisiti di progetto e piani di consegna. Potrebbe essere l'evoluzione del progettista o dell'architetto.

- **BIM Coordinator:** è la figura intermedia con compiti di coordinamento tecnico e controllo della qualità informativa dei modelli prodotti dai vari BIM Specialist. Verifica la coerenza e la conformità dei modelli, gestisce la federazione dei modelli multidisciplinari ed effettua la clash detection e la verifica delle interferenze tra i vari settori. Ha una visione trasversale del progetto ed è un punto di riferimento tecnico sia per i modellatori che per i responsabili di progetto.
- **BIM Manager:** È il profilo strategico e gestionale, il project manager del processo BIM. Definisce il piano di gestione informativa, seleziona e configura il CDE, gestisce le politiche di interoperabilità e si interfaccia con la committenza.

IFC (Industry Foundation Classes)

La colonna portante per quanto riguarda l'interoperabilità nei progetti BIM è rappresentata dallo standard ISO 16739:2013, che definisce formalmente le Industry Foundation Classes (IFC). Lo standard è stato sviluppato e viene continuamente aggiornato da buildingSMART International, l'organizzazione internazionale che promuove l'adozione di standard aperti per l'edilizia e le infrastrutture [35].



Figura 32 Logo Building Smart

Questo schema permette di rappresentare in modo integrato sia la geometria tridimensionale degli oggetti sia le informazioni non geometriche (proprietà, materiali, dati prestazionali, relazioni funzionali, ecc.). In un file IFC, ad esempio, una porta non sarà solo un solido nello spazio, ma un oggetto semantico completo: può contenere informazioni sul fatto che è una porta, a quale muro è collegata, di che materiale è fatta, chi l'ha progettata, quando è stata installata e quali prestazioni garantisce.

Il modello IFC è basato su una **struttura ad albero**, in cui ogni entità deriva da una classe superiore tramite un processo di **ereditarietà**. Al vertice di questa struttura si trova l'entità astratta **IfcRoot**, che costituisce il nucleo informativo minimo di ogni oggetto IFC [36]. Ogni elemento descritto nel file possiede almeno:

- un **GUID** (Globally Unique Identifier), ovvero un identificativo univoco e persistente;
- un **proprietario** dell'informazione (IfcOwnerHistory);

IfcRoot	
GlobalId	[1:1]
OwnerHistory	[0:1]
Name	[0:1]
Description	[0:1]

Figura 33 Attributi di IfcRoot

- un **nome**;
- una **descrizione**.

Da IfcRoot si diramano tre grandi categorie fondamentali:

- **IfcObjectDefinition**: rappresenta tutti gli oggetti fisici (es. muri, finestre, impianti), concettuali (es. spazi, zone) o di processo (es. attività, risorse umane);

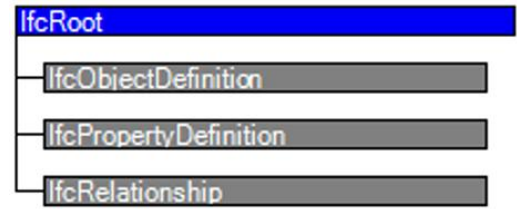


Figura 34 Alberatura principale Ifc

- **IfcPropertyDefinition**: descrive le proprietà e i set di proprietà (PropertySets) associabili agli oggetti, e permette di definire tipologie condivise (type object);
- **IfcRelationship**: definisce le relazioni logiche e strutturali tra oggetti, come ad esempio le relazioni di connessione (IfcRelConnects) o di assegnazione (IfcRelAssigns).

Attraverso questi tre pilastri, è possibile costruire un **modello informativo completo**, in cui ogni oggetto è:

- **definito nella sua identità e nel suo ruolo** (IfcObjectDefinition),
- **arricchito di informazioni aggiuntive** (IfcPropertyDefinition),
- **collegato logicamente ad altri oggetti o processi** (IfcRelationship).

Per garantire coerenza e correttezza nell'assegnazione delle informazioni, lo standard IFC utilizza **categorie di dati tipizzate**, tra cui:

- IfcIdentifier: identificatore univoco testuale;
- IfcReal: numero decimale reale;
- IfcText: stringa testuale descrittiva;
- IfcLabel: etichetta o nome compatto;
- IfcBoolean: valore logico (vero/falso).

Questi tipi di dati permettono di modellare informazioni eterogenee, da valori numerici (es. resistenza termica) a descrizioni testuali (es. marca del componente).

2.2.2 Digital Twin

Abbiamo visto come la rivoluzione della progettazione in BIM stia portando il mondo dell'ingegneria verso modelli digitali tridimensionali che riproducono fedelmente e dettagliatamente la realtà. Il Digital Twin si presenta come l'evoluzione di questo concetto, aggiungendo ai modelli statici quella dinamicità propria delle nuove tecnologie legate al mondo dell'IoT e dei big data.

Il Digital Twin è infatti la rappresentazione digitale della realtà in un modello tridimensionale, in grado di integrare al suo interno informazioni real-time sulle reali condizioni e sugli stati dell'oggetto reale stesso, trasformando un'istantanea (il modello 3D) in una vera e propria replica digitale, che segue l'oggetto durante tutto il suo ciclo di vita.

Il concetto di Digital Twin ha origini da applicazioni aerospaziale e nasce dall'esigenza della NASA di monitorare da remoto le condizioni operative delle navette spaziali attraverso una replica digitale aggiornata in tempo reale. Da allora, il concetto si è evoluto fino a diventare una tecnologia chiave nella digitalizzazione dei processi industriali e gestionali, trovando oggi applicazione in settori che spaziano dalla manifattura all'energia, dalla sanità all'edilizia [37].

Fu introdotto per la prima volta nel 2003 da Michael Grieves che teorizzò genericamente la realizzazione di un modello digitale che fosse replica del modello fisico. Fu poi la NASA nel 2012 a dare effettivamente vita e rendere realtà questa teoria. Da allora, il rapido sviluppo tecnologico nei settori della sensoristica e dell'attuazione, l'introduzione dei concetti di Internet of Things e Big Data, e l'aumento esponenziale della capacità di calcolo degli elaboratori ha portato il Digital Twin ad assumere un ruolo sempre più centrale nelle prospettive di sviluppo futuro, fino a candidarlo come una delle tecnologie più promettenti di questa decade.

Nel corso degli anni sono state proposte diverse definizioni del termine, differenti in base al campo di applicazione e alla maturità della tecnologia al momento della loro elaborazione [38].

References	Definitions	Applied fields
Grieves (2014)	The virtual digital representation equivalent to physical products	General
Glaessgen and Stargel (2012)	The DT is an integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built vehicle or system that employs the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin	Aerospace engineering
Hochhalter <i>et al.</i> (2014)	The DT is a life management and certification paradigm, where model and simulations consist of as-built vehicle states, as-experienced loads and environments, and other vehicle-specific history to enable high-fidelity modeling of individual aerospace vehicles throughout their service lives	Aerospace engineering
Ríos <i>et al.</i> (2015)	An integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built product that employs the best available physical models, sensor updates, history data, etc., to mirror the life of its corresponding physical twin	General
Parrott and Warsaw (2017)	An evolving digital profile of the historical and current behavior of a physical object or process that helps optimize business performance	IoT
Liu <i>et al.</i> (2018)	A replication of real physical production system in the DM, which are utilized for system optimization, monitoring, diagnostics and prognostics via integration of artificial intelligence, machine learning and software analytics with large volumes of data from physical systems	Manufacture engineering
Vrabic <i>et al.</i> (2018)	The DT is a digital representation of a physical item or assembly that uses integrated simulations and service data	General
Tao <i>et al.</i> (2019)	A real mapping of all components in the product lifecycle using physical data, virtual data and interaction data between them	Design engineering
Grieves and Vickers (2017)	A set of virtual information constructs that fully describes a potential or actual physical manufacturing product from the micro atomic level to the macro geometrical level	General
Madni <i>et al.</i> (2019)	A virtual instance of a physical system (twin) that is continually updated with the physical system's performance, maintenance, and health status data throughout the physical system's lifecycle	General

Figura 35 Definizioni di digital twin

Tra le tante definizioni riportate in Figura 35 **Definizioni di digital twin** spiccano sicuramente quella di Grieves, in quanto la prima:

“The virtual digital representation equivalent to physical product”

che, nello studio PLM (gestione del ciclo di vita del prodotto) lo chiamava ancora “Mirrored Spaces Model”. Il modello proposto descriveva tre principali componenti: lo spazio reale, quello virtuale, rappresentazione computerizzata della realtà, e un meccanismo di collegamento dei due. Nella versione virtuale, il modello poteva essere manipolato e modificato per valutare alternative costruttive e varianti progettuali.

Glaesegen e Stargel, nel 2012, propongono la loro definizione, associata ad applicazioni aerospaziali:

“The DT is an integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built vehicle or system that employs the best available physical model, sensor update, fleet history, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin”

Per la prima volta si focalizza l'attenzione sulla sensoristica e sull'aggiornamento dei dati in tempo reale e sulla loro storicizzazione. Viene anche enfatizzata fortemente la possibilità di applicazione per simulazioni tramite l'utilizzo di modelli fisici esterni.

Tra le definizioni più recenti, troviamo invece quella di Tao et al. Del 2019, che riferendosi al mondo del design industriale, descrive il Digital Twin come:

“A real mapping of all components in the product lifecycle using physical data, virtual data and interaction between them”

Secondo questa visione, un Digital Twin (DT) si articola in cinque componenti fondamentali: l'entità fisica, il modello virtuale (Virtual Model, VM), il sistema di servizio, i dati del Digital Twin e la connessione tra questi elementi. L'entità fisica rappresenta l'elemento reale osservabile del Digital Twin, corrispondente allo "spazio reale" definito da Grieves, il modello virtuale è la rappresentazione digitale dell'entità fisica e ne riflette geometria, caratteristiche, comportamento e regole operative. Al suo interno, un insieme strutturato di regole consente di formulare analisi, valutazioni e decisioni relative a specifiche situazioni operative.

I dati del Digital Twin comprendono attributi statici e dati dinamici sulle condizioni operative dall'entità fisica, output generati dalle simulazioni del modello virtuale e informazioni ottenute dall'esecuzione dei servizi associati.

Il sistema di servizio svolge la funzione di erogare servizi sia all'entità fisica sia al modello virtuale, ottimizzando il funzionamento dell'entità reale e regolando i parametri del modello virtuale al fine di garantirne la coerenza e la validità rispetto al sistema fisico corrispondente.

Elemento cruciale della definizione è infine la connessione bidirezionale e continua tra tutte le componenti, che rende possibile l'interazione e la collaborazione tra mondo reale e mondo digitale, permettendo al Digital Twin di agire come un sistema dinamico e adattivo.

3. SVILUPPI APPLICATIVI

3.1 Sistemi di monitoraggio

3.1.1 Valutazione delle performance di un sistema di monitoraggio: il metodo del Level Of Coverage (LOC)

L'efficienza energetica è da decenni al centro delle politiche nazionali e internazionali, rappresentando uno degli strumenti principali per ridurre sprechi ed emissioni e contribuire al raggiungimento degli obiettivi ambientali fissati per il 2030 e il 2050. In quest'ottica, normative e standard di riferimento come la ISO 50001:2018, la CEI 64-8/8-1 [39], la Direttiva 2012/27/UE [40], la UNI CEI EN 17267 e le Linee Guida ENEA [41] hanno introdotto metodologie rigorose per promuovere l'adozione di Sistemi di Gestione dell'Energia (SGE) e di piani di misura e monitoraggio strutturati.

La ISO 50001 in particolare ha posto l'accento su un approccio sistematico, basato sui dati e incentrato sul miglioramento continuo delle prestazioni energetiche, secondo il modello Plan-Do-Check-Act (PDCA). Parallelamente, norme come la UNI CEI EN 17267 specificano come progettare e implementare un piano di misura e monitoraggio che sia in grado di supportare il miglioramento prestazionale attraverso la raccolta e l'analisi di dati energetici e di fattori influenzanti.

Un elemento fondamentale, trasversale a tutte queste normative e linee guida, è il concetto di **Level of Coverage** (LoC), ovvero il livello di copertura assicurato dal sistema di misura rispetto ai consumi energetici reali dell'organizzazione. Il LoC rappresenta la capacità del sistema di raccogliere dati indipendenti e rappresentativi sugli usi significativi dell'energia, garantendo che le decisioni in materia di efficienza si basino su informazioni affidabili e aggiornate.

A supporto di una valutazione oggettiva, è stato introdotto un **Indicatore Numerico di Copertura (LoCNI)**, che esprime in modo sintetico il grado di copertura raggiunto, con valori compresi tra 0 (assenza di copertura) e 1 (copertura completa). Questo indicatore riveste un'importanza strategica poiché consente di:

- Quantificare il livello effettivo di monitoraggio energetico;
- Individuare le aree non adeguatamente coperte;
- Guidare interventi mirati di miglioramento del sistema di misura.

Inoltre, le Linee Guida ENEA hanno definito soglie minime di copertura richieste nei piani di monitoraggio a supporto delle diagnosi energetiche obbligatorie. Tali soglie sono differenziate in funzione del consumo complessivo dell'impianto (espresso in tonnellate equivalenti di petrolio - toe) per garantire un compromesso tra affidabilità dei dati raccolti e sostenibilità economica per le organizzazioni coinvolte.

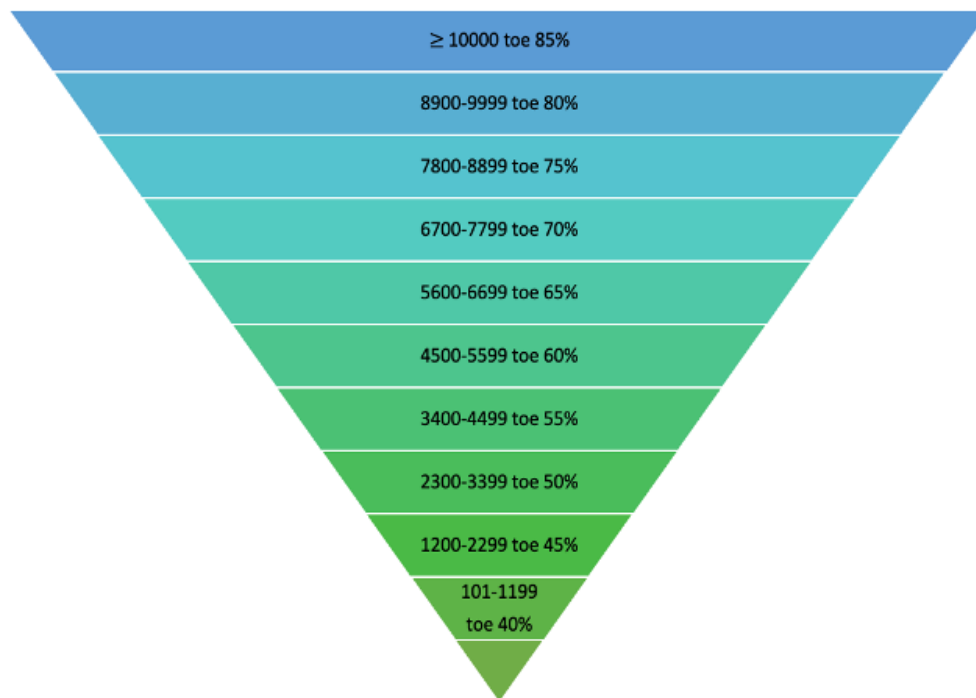


Figura 36 Percentuale di copertura del piano di misurazione e monitoraggio

In tale contesto, il Level of Coverage non è solo una misura di completezza tecnica, ma diventa un vero e proprio indicatore della maturità del sistema di gestione energetica, essenziale per l'ottenimento di risultati concreti e per il miglioramento continuo delle performance.

Procedura di calcolo

La procedura di calcolo del livello di copertura (LoC) segue una logica "bottom-up, iniziando l'analisi quindi dalle utenze più periferiche per proseguire verso i livelli superiori, fino al punto di consegna POD (Point of delivery) .

La procedura di analisi del livello di copertura può essere suddivisa vari passaggi, spiegati dettagliatamente a seguire [42].

1) Classificazione degli UZ dell'organizzazione (lista degli Usi significativi di energia a livello locale)

Il primo step per il calcolo del livello di copertura è quello di identificare i principali utilizzi significative dell'energia all'interno dell'edificio o dell'organizzazione, e suddividerli in base alle zone, da intendersi o effettivamente come zone dal punto vista geografico, o come settori o parti d'impianto. Va sottolineato come differenti zone non debbano condividere obbligatoriamente gli stessi usi finali di energia. Ad esempio, in un impianto industriale, l'illuminazione può rappresentare un uso significativo nelle aree ad uso ufficio, mentre potrebbe risultare trascurabile nelle aree di produzione.

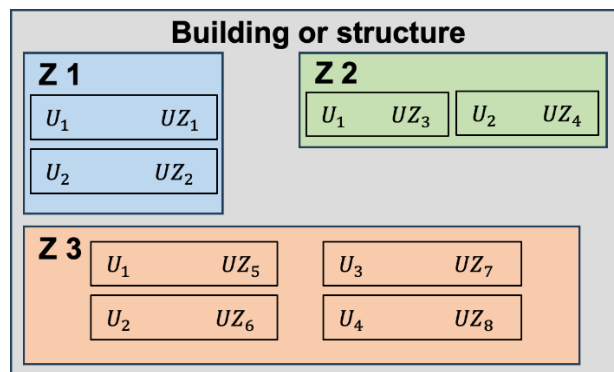


Figura 37 Esempio di suddivisione in zone e usi

Individuate zone e usi significativi, vengono assegnati dei pesi energetici ai singoli usi significativi zonali dell'energia come frazione rispetto all'energia totale consegnata al POC (equazione 1).

$$1) \quad e_{UZ} = \frac{W_{UZ}}{W_{POC}} [p.u.]$$

Per calcolare due valori di energia presenti nell'equazione 1 (W_{UZ} e W_{POC}) è possibile usare dati storici se disponibili, stime basate sulle potenze nominali dei circuiti o degli apparecchi, o campagne di misurazioni limitate ad intervalli temporali significativi per l'utilizzo in esame.

2) Analisi dell'architettura del sistema e rilevazione di livelli, quadri elettrici e circuiti

Lo step successivo è quello di analizzare l'impianto elettrico al fine di individuare i livelli di distribuzione del sistema, identificando tutti i quadri di distribuzione e locali e le connessioni tra essi.

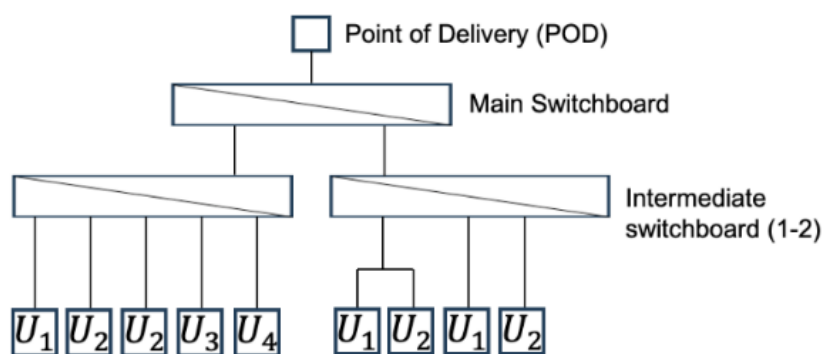


Figura 38 Schema di distribuzioni e usi finali

3) Analisi combinata dell'architettura del sistema con la lista degli UZ

A questo punto è possibile integrare le due analisi precedenti e ottenere un diagramma di sintesi che rappresenti l'impianto elettrico suddiviso per zone e usi finali dell'energia.

Può accadere che un UZ sia alimentato da più di un circuito oppure che un circuito alimenti più di un UZ, quindi. Per tenere conto di ciò vengono introdotti due nuovi parametri:

NCUZ: numero di circuiti che alimentano lo stesso UZ;

NUZ: numero di UZ alimentati dallo stesso Circuito.

Quindi il valore NCUZ può essere letto come il numero di circuiti che alimentano quella determinata UZ, mentre il valore NUZ può essere letto come il numero di utenze che sono alimentate da quel circuito. Un esempio esplicativo di applicazione di ciò è presentato in

Figura 39.

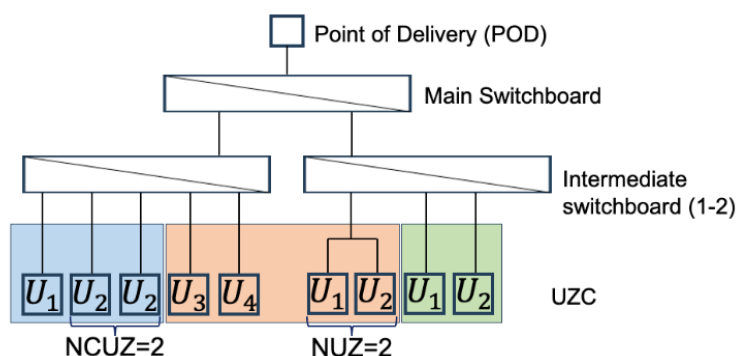


Figura 39 Esempio di NCUZ e NUZ

4) Analisi dei pesi energetici dei circuiti

È ora possibile calcolare il peso energetico di ogni circuito, inteso come rapporto tra l'energia del circuito e l'energia del quadro che lo sottende, seguendo la formula 2.

$$2) \quad e_c = \sum_{i=1}^{NUZ_c} \frac{e_{uz_i}}{NCUZ_i}$$

Dove: e_{uz_i} è il peso energetico dell'i-esimo UZ alimentato dal circuito C;

$NCUZ_i$ è il numero di circuiti che alimentano Uzi;

NUZ_c è il numero di UZ che alimentate dal circuito.

5) Analisi dei pesi energetici dei quadri elettrici

I pesi dei quadri elettrici non dipendono dal loro livello di alimentazione ma vengono calcolati come rapporto tra l'assorbimento del quadro e l'assorbimento dell'intera struttura (formula 3).

$$3) \quad e_{sb_j} = \frac{W_{sb_j}}{W_{PoC}} [p.u.]$$

Lo stesso risultato si dovrebbe ottenere seguendo invece la formula 4, utile come verifica della bontà dei pesi assegnati.

$$4) \quad e_{sb_j} = \sum_i e_{c_i} [p.u.]$$

Infatti, la sommatoria dei pesi energetici dei circuiti che si diramano da un determinato quadro deve essere uguale al peso energetico del quadro stesso.

6) Analisi dei pesi energetici dei circuiti rispetto ai quadri elettrici

È possibile calcolare anche l'energia assorbita da un circuito come rapporto tra dei pesi energetici calcolati in precedenza tramite la formula 5:

$$5) \quad W_{c_i} = \frac{e_{c_i}}{e_{sb_j}} [p.u.]$$

7) Analisi dei pesi energetici degli UZC

L'energia assorbita dal singolo uso finale alimentato dal circuito "c" può essere calcolata con la formula 6:

$$6) \quad W_{UZC_i} = \frac{e_{uz_i}}{e_{c_i}} \cdot \frac{1}{NCUZ_i} [p.u.]$$

8) Analisi del Fattore di Copertura LOC_M di un misuratore

La procedura per il calcolo del livello di copertura si basa su un processo bottom-up. I primi livelli di copertura calcolati, quindi, sono quelli relativi al singolo misuratore.

$$7) \quad LoC_{M(i)} = W_c \cdot f(\max(W_{UZC_j}))$$

Questi possono essere calcolati moltiplicando il peso del circuito monitorato rispetto al quadro, per una funzione del massimo utilizzo energetico zonale alimentato dal circuito. La definizione di questa funzione influenza fortemente i risultati dell'intera procedura, ed è stato oggetto di studio per identificare quale fosse il metodo migliore in termini di rappresentazione della qualità del sistema di monitoraggio, e di comprensione dei suoi punti di forza e di debolezza al fine di poter guidare eventuali interventi migliorativi.

Tale analisi è stata effettuata applicando il metodo di calcolo a un caso studio reale in un impianto industriale, presentato nel capitolo successivo, prendendo in considerazione quattro possibilità in ordine crescente di severità, riassunte nella seguente tabella:

Dove $CM_K = f(\max(W_{UZC_j}))$

CASE	A	B	C	D
max(Wb)	CMk	CMK	CMk	CMK
≤ 0.5	0	0	0	max(wb)
$0.5 < e < 0.75$	0.5	0.25	0	max(wb)
$0.75 \leq e < 1$	0.75	0.5	0	max(wb)
$= 1$	1	1	1	1

Figura 40 funzioni per il calcolo dei CM_K

9) Analisi del Fattore di Copertura relativo $LoCLP$ di un Quadro

Proseguendo verso l'alto, è possibile calcolare il fattore di copertura relativo ad un quadro come somma dei LoC dei misuratori (o circuiti) contenuti al di sotto di esso.

$$8) \quad LoC_{sb} = \sum LoC_M$$

Un valore unitario del LoC_{sb} indica che gli usi energetici appartenenti a quel quadro vengono monitorati senza alcuna promiscuità, con una disaggregazione massima.

10) Analisi del Fattore di Copertura assoluto $ALoC_{sb}$ di un quadro

Lo stesso fattore può essere calcolato in valore assoluto, riferendolo direttamente ai consumi energetici al POC, moltiplicando il livello di copertura relativo i-esimo per il peso energetico dell'i-esimo quadro:

$$9) \quad ALoC_{sb} = LoC_{sb} \cdot e_{sb}$$

Nel caso di copertura totale tale valore coincide con il peso energetico del quadro.

11) Analisi del Fattore di Copertura LoC di un livello

Il fattore di copertura assoluto viene utilizzato quindi per il calcolo del fattore di copertura dei livelli superiori, semplicemente sommando gli $ALoC$ dei quadri sottesi dallo stesso quadro principale, fino ad arrivare al punto di consegna.

$$(9) LoC_{DMS} = \sum ALoC_{sb}$$

12) Analisi del Fattore di Copertura di un quadro elettrico, considerando un misuratore a monte (se presente)

Nel caso in cui fosse presente un misuratore a monte di un quadro si può inserire un misuratore a valle su un circuito non monitorato considerandolo come se misurasse virtualmente la differenza tra quello a monte e quelli a valle, come mostrato in *Figura 41* per il circuito c_8 , con un misuratore virtuale disegnato in violetto.

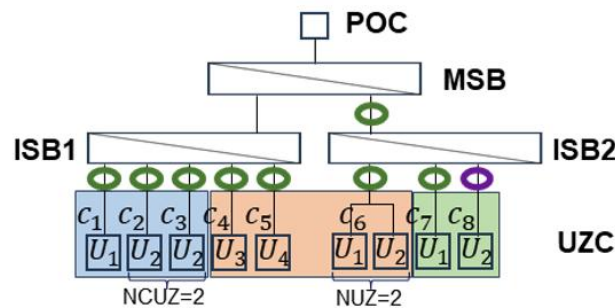


Figura 41 esempio di misuratore virtuale (in violetto)

3.1.2 Case study industriale: Daikin Applied Europe

La metodologia appena descritta è stata applicata ad un caso reale al fine di poter valutare quale tra le quattro funzioni per il calcolo del Level of Coverage dei misuratori fornisca un risultato che sia rappresentativo dell'effettiva efficacia del Sistema di monitoraggio e allo stesso tempo indicativo delle aree di minor copertura, e quindi suscettibili a futuri interventi di miglioramento. È stato preso in esame un sito industriale situato nella località di Ariccia, dedito alla produzione e ai test di macchine frigorifere.

Descrizione del sito

L'intero stabilimento è costituito da 4 edifici principali dove hanno luogo le attività di produzione, assemblaggio e stoccaggio dell'impianto:

1. Capannone chiller
2. Capannone SIC (small inverter chiller)
3. Capannone 3000TON

4. Capannone Compressori



Figura 42 impianto di produzione. Vista dall'alto

Per quanto riguarda l'impianto elettrico, il sito dispone di una propria rete di distribuzione di media tensione. Dal punto di connessione partono quattro linee che raggiungono quattro sbarre che alimentano 10 trasformatori di potenza. Sono tutti trasformatori MT/BT da 20'000/400 V, ad eccezione dei TR5 e il TR1 "ANSALDO" che presentano un rapporto di trasformazione 20'000/600 V e non sono stati presi in considerazione in quanto utilizzati sporadicamente per o test di macchinari particolari e inattivi durante il periodo di analisi. I trasformatori 1, 3 e 4 alimentano la zona di produzione dei chiller, i trasformatori 4A, 4B e 6 alimentano la zona TON, i trasformatori 1 QEGBT e 1F alimentano rispettivamente le zone di produzione dei piccoli chiller inverter e dei compressori. La tabella 1 mostra la potenza nominale degli 8 trasformatori.

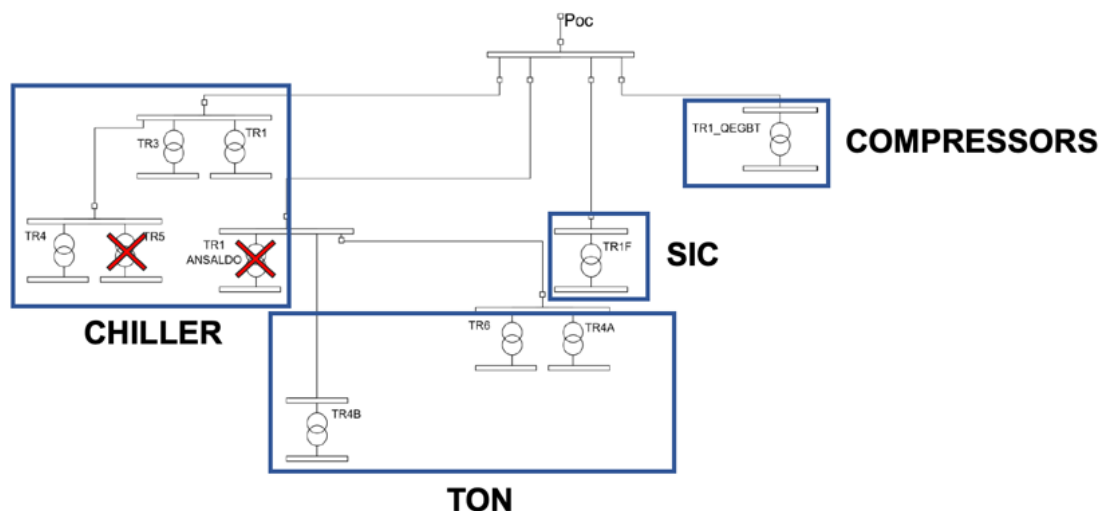


Figura 43 suddivisione dell'impianto in zone

Tabella 1 potenza nominale dei trasformatori

Transformer	Power [kVA]
TR1F	1250
TR3	2500
TR1	2500
TR4A	1250
TR1_QEGBT	630
TR6	2500
TR4	1000
TR4B	1250

All'interno dello stabilimento è stato installato un sistema di monitoraggio energetico permanente finalizzato all'analisi dettagliata dei consumi disaggregati per aree e utilizzi dell'energia. Il sistema di monitoraggio distribuito è composto da un totale di 62 multimetri trifase EMM-4hm (*Figura 44*), dislocati nell'impianto come in *Figura 45*. Prevedono un collegamento in parallelo alla linea monitorata per la misura della tensione e utilizzano un trasformatore amperometrico per la misura della corrente, ottenendo misure di tensione e corrente, potenza attiva, reattiva e apparente, energia, fattore di potenza e frequenza, totali e per singola fase.



Figura 44 Multimetro EMM-4hm

L'architettura del sistema prevede una comunicazione ModBUS RTU in cavo seriale RS-485 tra i multimetri e il concentratore MOXA MB-3170, che svolge anche il ruolo di gateway verso il protocollo TCP-IP, utilizzato per la comunicazione verso il server centrale che ospita il software di gestione e visualizzazione McuboEnergy.



Figura 45 posizionamento dei multimetri nell'impianto

Applicazione metodologia LOC

Come visto in precedenza, l'analisi del livello di copertura di un sistema di monitoraggio energetico ha inizio con la classificazione delle utenze e degli usi energetici presenti all'interno del sistema analizzato. D'accordo con l'energy manager dell'impianto, si è scelto di seguire la classificazione suggerita dalle linee guida ENEA, suddividendo tutte le utenze in tre categorie principali:

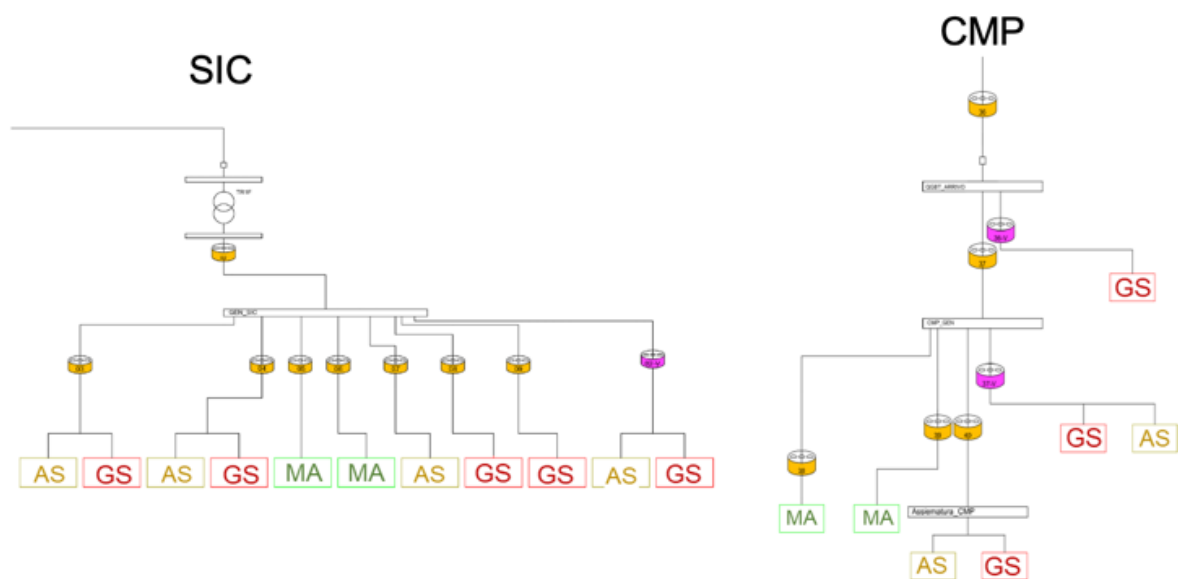
- Attività principali: utenze strettamente legate all'attività produttiva dell'impianto come le unità di assemblaggio, i banchi prova e le postazioni di lavoro
- Servizi ausiliari: utenze a servizio dell'attività produttiva come pompe, forni e unità di movimentazione
- Servizi generali: utenze legate ai servizi tipici di un edificio ma non coinvolte direttamente alla produzione come l'illuminazione, l'HVAC, servizi igienici, ecc.

Una volta classificate le utenze, è necessario suddividerle in zone, scelte in questo caso sulla base del trasformatore MT/BT che le alimenta. Sono state individuate quindi 8 zone, ed è stato assegnato loro il nome del capannone corrispondente (numerato in caso di più zone nello stesso capannone:

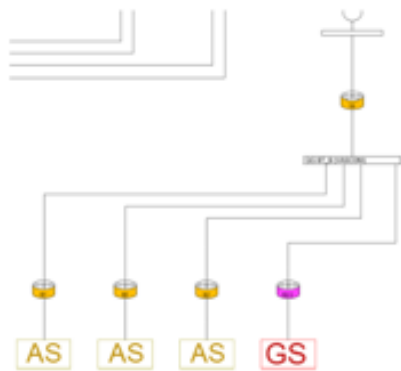
1. SIC
2. CMP

3. TON6
4. TON4B
5. TON4A
6. CHILLER1
7. CHILLER3
8. CHILLER4

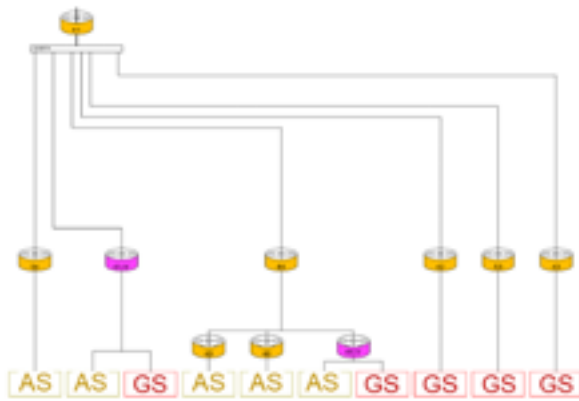
È stato quindi possibile definire il layer energetico dell'impianto, che permette di comprendere come sono raggruppati i vari usi energetici significativi e quali multimetri sottendono. Nelle figure a seguire è riportato il risultato di tale analisi per singola zona, dove in giallo sono rappresentati i multimetri realmente installati mentre in viola quelli virtuali, i cui valori vengono ricavati per differenza tra il valore del multimetro a monte e la somma dei valori dei multimetri a valle. In questa fase è già possibile anticipare quali misuratori otterranno nell'analisi di valutazione un valore massimo in quanto monitorano in maniera completamente disaggregata un unico uso di energia. È il caso, ad esempio, di tutti i multimetri della zona TON4B, TON4A, CHILLER1 e CHILLER4, mentre, partendo da destra, i primi due multimetri della zona SIC monitorano consumi misti tra utilizzo di servizi ausiliari e generali, così come quello virtuale (l'ultimo a destra).



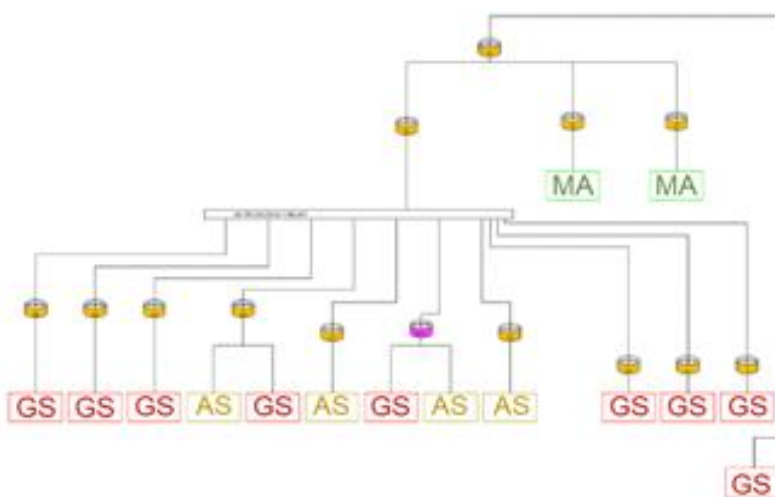
TON4B



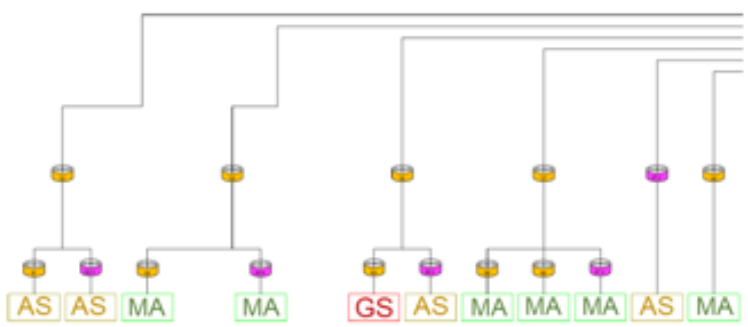
TON4A



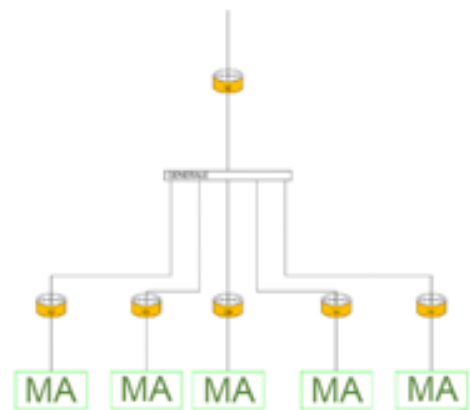
CHILLER3



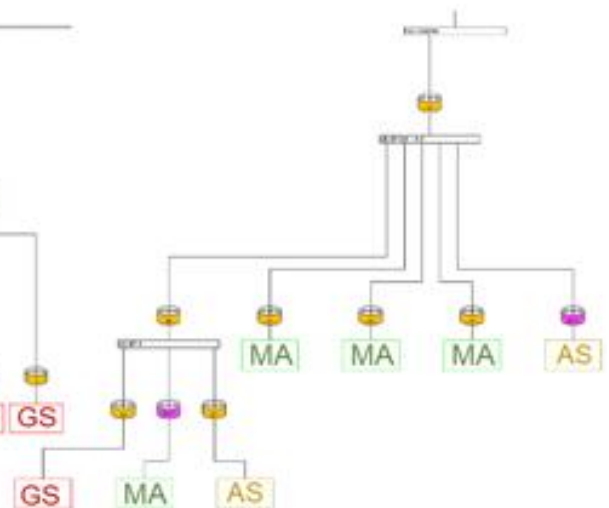
TON6



CHILLER1



CHILLER4



Lo step successivo nell'applicazione del metodo consiste nel calcolo dell'energia consumata per ogni uso zonale dell'energia U_{izj} , e dei loro pesi energetici. Per poter effettuare questo calcolo è stato necessario innanzitutto definire un periodo di riferimento, scelto di due mesi, per poter confrontare dati energetici uniformi. È stata quindi calcolata l'energia consumata dall'intero impianto nei due mesi selezionati, utilizzando direttamente la somma dei valori forniti dai multimetri installati presso gli 8 trasformatori, e calcolato il peso di ogni utilizzo energetico zonale tramite la formula:

$$10) \quad e_{U_{izj}} = \frac{W_{U_{izj}}}{W_{POC}} [p. u.]$$

Dove $W_{U_{izj}}$, l'energia consumata dal singolo utilizzo zonale, è stata ricavata direttamente dal valore del multimetro installato quando possibile, o stimata. Per la stima sono stati considerati i valori nominali degli interruttori per quelle utenze caratterizzate da un utilizzo costante e continuativo, mentre per quelle con un carattere variabile sono state eseguite brevi campagne di monitoraggio (di 24 ore) tramite strumentazione mobile, e i dati ottenuti sono stati opportunamente proiettati sull'arco temporale di riferimento, tenendo in considerazione giorni lavorativi o festivi in base al tipo di utenza.

A titolo di esempio si riporta il grafico della ripartizione percentuale dei consumi delle varie zone nel periodo di riferimento dell'analisi:

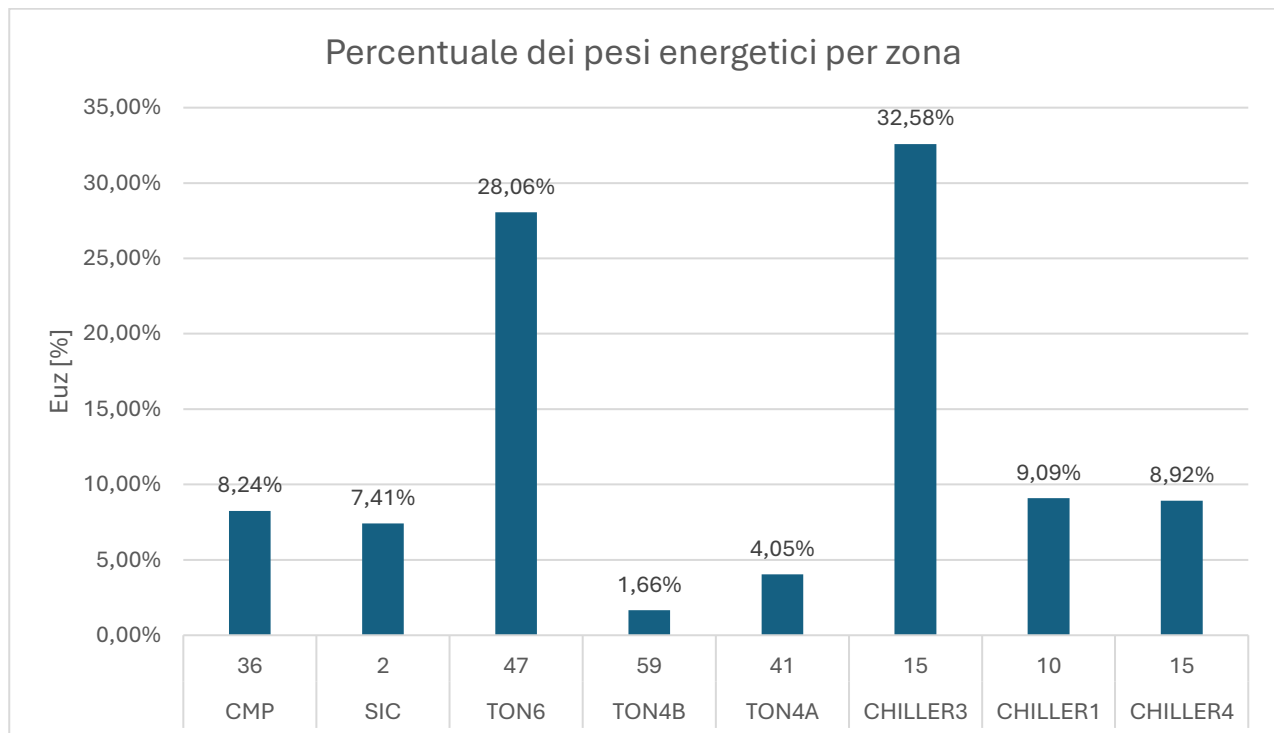


Figura 46 ripartizione percentuale dei consumi

Proseguendo con l'analisi, è possibile ora calcolare il peso energetico dei circuiti come somma dei pesi energetici dei singoli usi zonali utilizzando la formula:

$$11) \quad e_{c_i} = \sum_{i=1}^{NUZ_c} \frac{e_{uz_i}}{NCUZ_i}$$

Dove NCUZ rappresenta il numero di circuiti che alimenta lo stesso uso zonale.

Per semplicità espositiva, nel seguito si mostrerà il calcolo della sola zona SIC, facendo riferimento alla nomenclatura riportata in **Figura 47**.

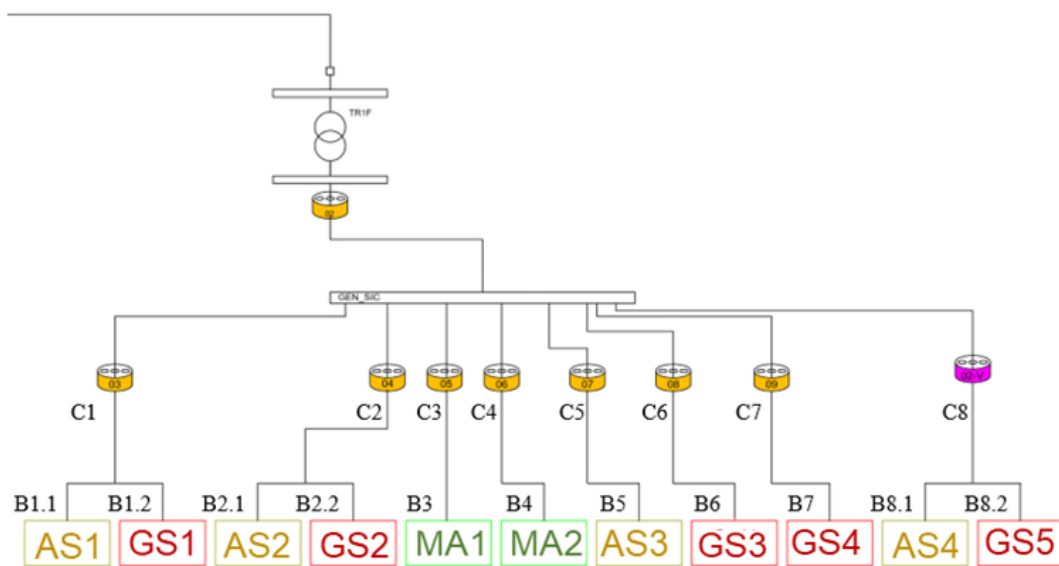


Figura 47 Layer energetico zona SIC

Nella zona SIC non sono presenti usi energetici alimentati da più circuiti e di conseguenza l'NCUZ assumerà sempre un valore unitario.

Utilizzando la medesima procedura è possibile ottenere i pesi energetici dei livelli superiori.

Si è giunti finalmente al calcolo dei primi livelli di copertura, ossia quelli riferiti ai singoli misuratori, possibile tramite la formula:

$$12) \quad LOC_{M_k} = e_{c_x} \cdot C_{M_k} \quad [p. u.]$$

Per poter applicare tale formula, è prima necessario definire i coefficienti C_{M_k} come funzione del massimo peso energetico sotteso al misuratore, e, come anticipato, sono stati esaminati e comparati quattro differenti metodi

CASE	A	B	C	D
max(Wb)	CMk	CMK	CMk	CMK
≤ 0.5	0	0	0	max(wb)
$0.5 > e < 0.75$	0.5	0.25	0	max(wb)
$0.75 \Rightarrow e < 1$	0.75	0.5	0	max(wb)
≈ 1	1	1	1	1

di assegnazione (per agevolare la lettura si riporta la tabella riassuntiva dei metodi).

I risultati dei calcoli appena descritti, per la zona SIC, sono riassunti nella **Tabella 2**, dove sono riportati in ordine, da destra verso sinistra, il nome del circuito, il nome assegnato al singolo ramo, l'uso energetico zonale, il peso energetico dell'uso zonale e quello del circuito, e infine i valori dei coefficienti calcolati secondo il metodo A, B, C e D.

Tabella 2 risultati calcoli pesi energetici e C_{M_k} zona SIC

CIRCUIT	BRANCH	UZ	e_{UZ}	e_C	W_{uz}	$C_{M_k}(A)$	$C_{M_k}(B)$	$C_{M_k}(C)$	$C_{M_k}(D)$
C1	B1.1	AS 1	0.0148	0.0241	0.6138	0.50	0.25	0	0.61
C1	B1.2	GS 1	0.0093		0.3862				
C2	B2.1	AS 2	0.0032	0.0184	0.1755	0.75	0.50	0	0.82
C2	B2.2	GS 2	0.0152		0.8245				
C3	B3	MA 1	0.0034	0.0034	1	1	1	1	1
C4	B4	MA 2	0.0042	0.0042	1	1	1	1	1
C5	B5	AS 3	0.0100	0.0100	1	1	1	1	1
C6	B6	GS 3	0.0021	0.0021	1	1	1	1	1
C7	B7	GS 4	0.0090	0.0090	1	1	1	1	1
C8	B8.1	AS 5	0.0002	0.0030	0.0544	0.75	0.5	0	0.95
C8	B8.2	GS 5	0.0028		0.9456				

Risalendo l'impianto verso il POC si calcolano quindi i livelli di copertura delle 8 zone e dell'intero sistema di monitoraggio, ottenendo i risultati riportati in **Tabella 3** e **Figura 48** LOC per metodo A, B, C, D.

Tabella 3 LOC e perdite totale e delle singole zone

ZONE	e_{uz}	A		B		C		D	
		LoC	LOSSES	LoC	LOSSES	LoC	LOSSES	LoC	LOSSES
CMP	0.0824	0.0644	0.0180	0.0498	0.0326	0.0237	0.0587	0.0734	0.0090
SIC	0.0741	0.0539	0.0202	0.0405	0.0336	0.0203	0.0538	0.0595	0.0147
TON6	0.2806	0.2806	0.0000	0.2806	0.0000	0.2806	0.0000	0.2806	0.0000
TON4B	0.0166	0.0166	0.0000	0.0166	0.0000	0.0166	0.0000	0.0166	0.0000
TON4A	0.0405	0.0309	0.0096	0.0236	0.0169	0.0115	0.0290	0.0347	0.0058
CHILLER3	0.3258	0.2592	0.0665	0.2267	0.0990	0.1942	0.1316	0.2850	0.0407
CHILLER1	0.0909	0.0906	0.0003	0.0906	0.0003	0.0906	0.0003	0.0906	0.0003
CHILLER4	0.0892	0.0892	0.0000	0.0892	0.0000	0.0892	0.0000	0.0892	0.0000
TOT	1	0.8854	0.1146	0.8175	0.1825	0.7267	0.2733	0.9295	0.0705

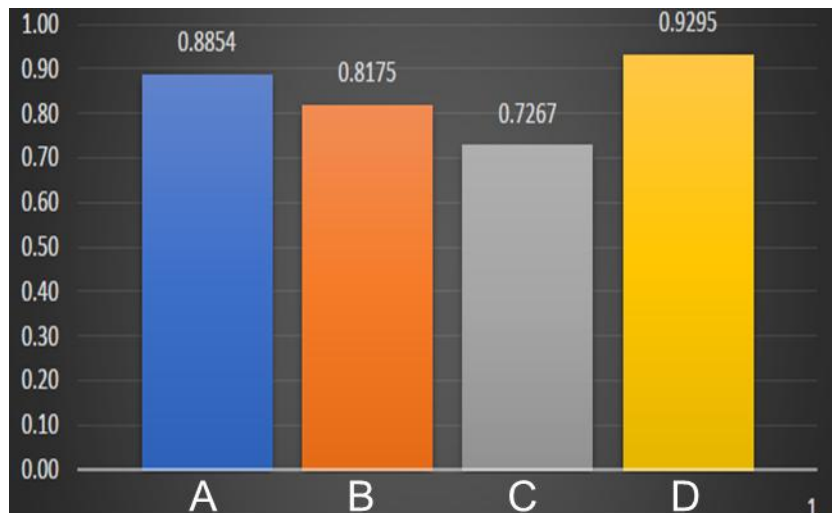


Figura 48 LOC per metodo A, B, C, D

Si può osservare come nelle zone TON6, TON4B e CHILLER4 le perdite risultano pari a zero. Questo è coerente con quanto emerso dall'analisi dei layer energetici precedentemente mostrati, dai quali si evince che tali zone sono monitorate da multimetri in grado di disaggregare completamente i consumi delle differenti utenze. La situazione è particolarmente vantaggiosa nella zona TON6, rappresentando circa il 28% del consumo totale del sistema. Anche la zona CHILLER1 può essere considerata priva di perdite, in quanto il valore riportato in tabella (0,03%) è attribuibile esclusivamente alle perdite fisiologiche degli strumenti di misura installati, non apprezzabili per le tre zone precedenti, poiché in quel caso sono stati utilizzati multimetri virtuali calcolati per differenza.

Conclusioni

Il livello di copertura (*Level of Coverage*) ha due obiettivi principali: valutare l'efficacia del sistema di monitoraggio e fornire all'energy manager indicazioni concrete su come migliorarlo. La scelta del metodo di calcolo più adatto dovrebbe rappresentare un compromesso tra queste due finalità.

L'analisi condotta ha messo a confronto quattro diversi metodi di calcolo. I metodi A e D risultano eccessivamente generosi nella valutazione, attribuendo punteggi molto elevati anche a zone in cui il sistema di monitoraggio potrebbe essere migliorato. Ad esempio, per la zona TON4A, le perdite risultano pari rispettivamente a 0,0096 e 0,0058, valori talmente bassi da rendere difficile individuare le aree in cui la precisione del monitoraggio è carente. Questo porta a un valore complessivo del *Level of Coverage* elevato, anche in presenza di margini di miglioramento rilevanti.

Il metodo C, al contrario, pone una forte enfasi sull'individuazione delle criticità, ma risulta troppo severo nella valutazione complessiva: nel caso analizzato, il valore finale di copertura è pari a 0,7267, nonostante il sistema sia generalmente ben monitorato.

Il metodo B emerge come il più equilibrato, riuscendo a soddisfare entrambi gli obiettivi dell'indicatore. Esso fornisce una valutazione coerente del sistema di monitoraggio e dei livelli di perdita, evidenziando con chiarezza le aree migliorabili. Ad esempio, risulta immediatamente evidente la necessità di un aggiornamento del sistema nella zona CHILLER3, dove le perdite si avvicinano allo 0,1, pur riconoscendo che il sistema è nel complesso ben progettato.

3.1.3 Sviluppo di una piattaforma di monitoraggio per il Laboratorio LAMBDA

Lo studio di tecnologie IoT, piattaforme informatiche di monitoraggio, gestione e controllo di queste e di Digital Twin può essere molto efficace se affiancato a una messa in opera pratica di quanto appreso. Il laboratorio di impianti elettrici del dipartimento di Ingegneria Astronautica, elettrica ed Energetica (DIAEE) dell'Università "La Sapienza" di Roma, il laboratorio LAMBDA, è il luogo ideale per testare sul campo nuove idee e tecnologie. È stato quindi realizzato un sistema di monitoraggio energetico del laboratorio stesso sfruttando la tecnologia hardware già presente e integrandola nella versatile piattaforma di building automation "Home Assistant", installata in un PC fisso dedicato, elevandolo così a server del laboratorio.

La micro-rete del laboratorio

Il laboratorio Lambda ha una vasta dotazione impiantistica sia per quanto riguarda il sistema elettrico sia per quanto riguarda i dispositivi intelligenti a suo servizio.

Per quanto riguarda l'impianto elettrico, il cuore del sistema è il quadro elettrico generale, situato all'interno del laboratorio, al quale confluiscono tutti i circuiti di generazione, accumulo e utilizzo della rete. Il quadro è infatti alimentato da molteplici sorgenti:

- In primis è collegato alla rete elettrica del dipartimento, assorbendo energia quando la generazione da fonti rinnovabili risulta inferiore ai consumi e immettendola quando si ha un surplus.
- Un impianto fotovoltaico da 12 kWp composto da 2 stringhe in parallelo da 22 moduli policristallini ciascuna posizionate sul tetto del dipartimento, collegate ad un inverter trifase collocato all'interno del laboratorio.

- Un impianto fotovoltaico da 1,2kWp composto da 6 moduli policristallini posizionati anch'essi sul tetto del dipartimento e un inverter monofase all'interno del laboratorio
- Un gruppo elettrogeno posto all'esterno dell'edificio
- Un sistema di accumulo elettrico all-in-one situato all'interno del laboratorio con uscita diretta in corrente alternata e sistema di controllo e comunicazione integrato

Tutte le sorgenti convergono al quadro e, tramite interruttori magnetotermici e sezionatori sono collegate alla sbarra B (*Figura 49*) dalla quale parte anche il circuito "generale servizi" che alimenta tutti i carichi:

- Illuminazione
- Condizionamento
- Gruppo prese 1,2, 3 e 4
- Una presa trifase di servizio
- Un ufficio
- Una riserva trifase
- L'UPS dedicato al server di laboratorio e ai sistemi di building automation

Una seconda sbarra (QRV) alimenta tre circuiti dedicati a prove sperimentali.

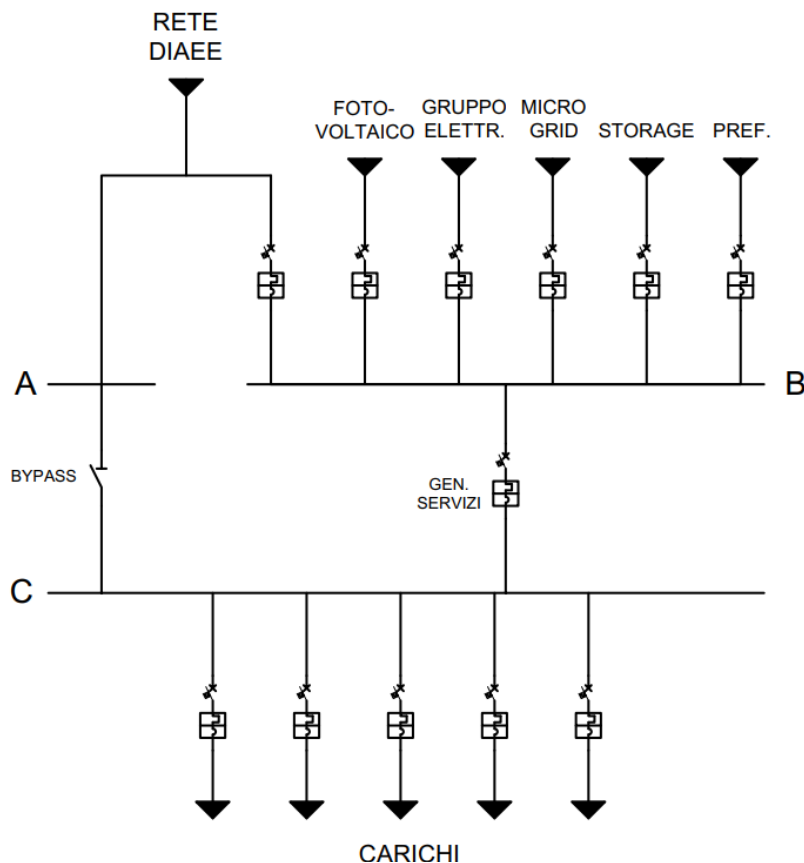


Figura 49 Schema elettrico microrete laboratorio LAMBDA

Il sistema prevede un ulteriore collegamento diretto tra la rete elettrica dell'edificio e i carichi tramite il sezionatore di by-pass pensato per consentire l'alimentazione del laboratorio anche nel caso in cui si abbia la necessità di isolare la sbarra B mentre, nel normale funzionamento dell'impianto è tenuto aperto.

Il quadro è dotato di un sistema di monitoraggio avanzato e capillare basato su protocollo ModBus, in grado di monitorare sia i flussi di potenza che i parametri elettrici principali quali tensioni, correnti, fattori di potenza e stato degli interruttori.

L'architettura del sistema è composta da due reti ModBus RTU interfacciate tra loro lato IP. La prima fa capo al dispositivo COMX 510 prodotto dalla Schneider Electric che ha il ruolo di concentratore e gateway. Ad esso sono collegati 5 multimetri digitali iEM 3150 della stessa casa produttrice con collegamento ad inserzione diretta sui circuiti principali: generale, fotovoltaico trifase, storage, preferenziali e generali servizi. Gli altri circuiti sono invece monitorati tramite 12 Power Tag monofase e 4 trifase. Questi dispositivi utilizzano un collegamento in parallelo per la misurazione della tensione e tramite trasformatore amperometrico a nucleo chiuso rilevano la corrente passante. Possono essere inseriti a monte o a valle dell'interruttore e con un fattore di forma molto ridotto consentono di ottimizzare gli spazi all'interno del quadro. Comunicano wireless con protocollo Zigbee verso 3 Smartlink, dispositivi che hanno il ruolo di concentratore: sono a loro volta collegate tra loro a formare la seconda rete ModBus RTU, e una di queste assume il ruolo da master ModBus e gateway verso la rete IP. Oltre ai powerTag, raccolgono i dati provenienti da 22 OF+SD24, contatti ausiliari, collegati meccanicamente agli interruttori, in grado di rilevare lo stato di quest'ultimi e se sono stati aperti manualmente o per intervento della protezione.

La piattaforma di monitoraggio

Sfruttando una tale dotazione hardware è stato possibile realizzare un sistema di monitoraggio avanzato. Un computer fisso del laboratorio è stato dedicato alla funzione di server: in ambiente Linux è stato installato in un container Docker dedicato l'applicativo Home Assistant, trasformandolo di fatto nel supervisore dell'intero laboratorio. In questa sezione ci si limiterà a descrivere la sua funzione da EMS (Energy Monitoring System) ma lo stesso sistema è sfruttato per la gestione dell'intero laboratorio e per ospitare il suo Digital Twin (descritto nei capitoli a seguire).

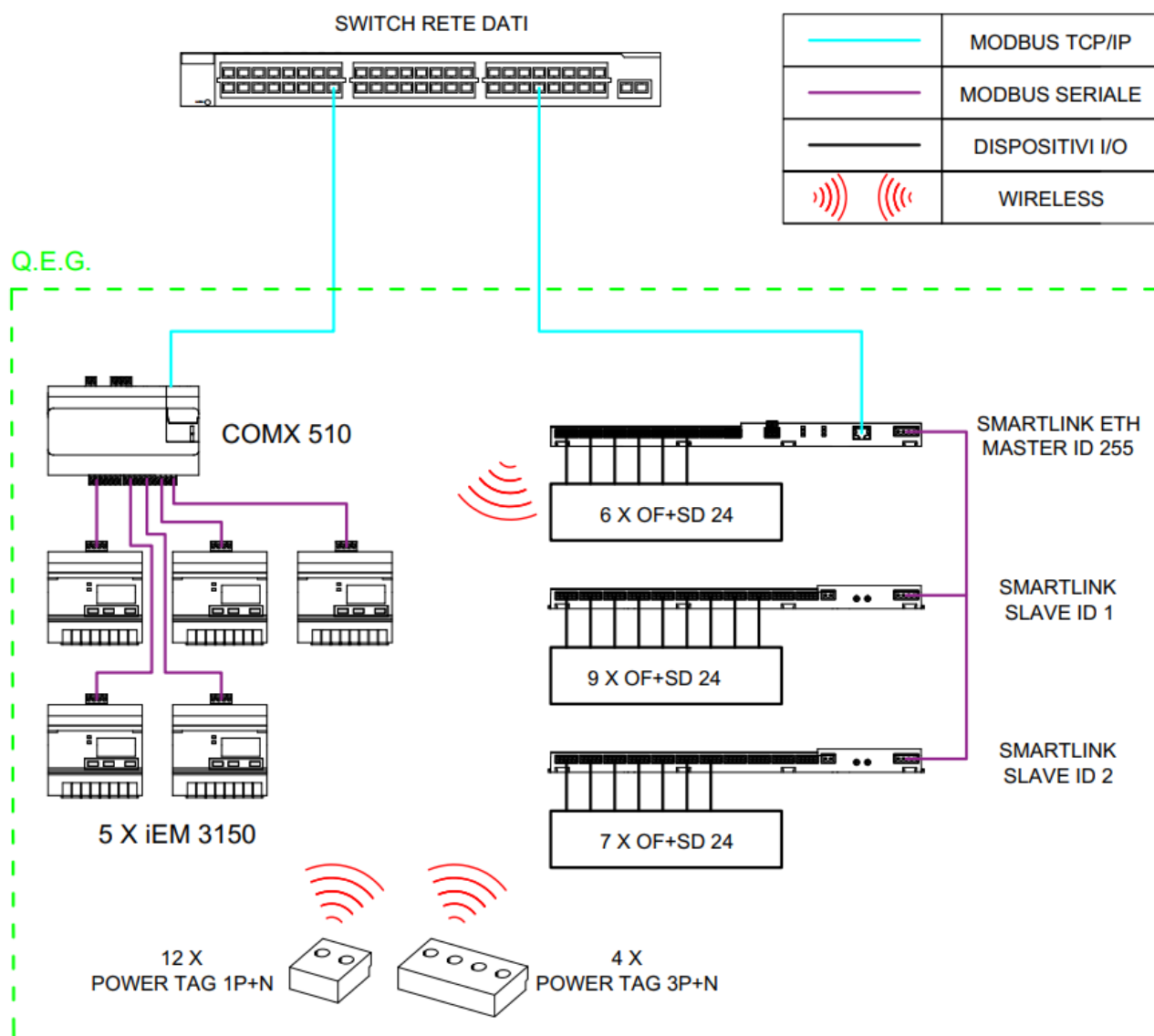


Figura 50 Architettura del sistema di monitoraggio del laboratorio LAMBDA

Come anticipato nel paragrafo dedicato, Home Assistant permette di gestire una grande moltitudine di dispositivi e sistemi grazie alle integrazioni: moduli software contenenti tutto il necessario per tradurre le informazioni da differenti protocolli nell'architettura invece propria di Home Assistant, previa opportuna configurazione. L'integrazione necessaria in questo caso è proprio quella di ModBus. Per questa integrazione non è possibile una configurazione tramite interfaccia grafica richiedendo quindi una configurazione tramite file YAML. L'intera configurazione di Home Assistant, realizzata sempre in YAML, è contenuta nel file "configuration.yaml" nella cartella di root del sistema. Per sistemi di dimensioni modesta la configurazione delle singole integrazioni può essere realizzata all'interno di questo file, ma per rendere il sistema più ordinato e fruibile si è scelto di dedicare un file apposito a ModBus, richiamato all'interno del file di configurazione principale tramite il comando "modbus: !include modbus.yaml". La costruzione de file di configurazione non

risulta difficile ma richiede molta attenzione: i file “.yaml” richiedono un’indentazione e gestione degli “spazi” (inteso come carattere ASCII) molta rigorosa, che se non rispettata impedisce al sistema di avviarsi.

Per accedere ai dati il server si interfaccia con i gateway sull’infrastruttura TCP/IP, quindi i primi parametri che andranno inseriti nella configurazione sono i riferimenti TCP/IP ai gateway:

- Name: un identificativo per permettere al sistema di distinguere due gateway differenti
- Type: il tipo di connessione che si vuole instaurare con il gateway (“tcp” o “udp”)
- Host: l’indirizzo IP del gateway
- Port: la porta tramite la quale avviene la comunicazione (per Modbus la 502 è la porta standard)

Una volta identificato il gateway è necessario addentrarsi nella rete Modbus vera e propria; questo va fatto per ogni singola entità che si vuole integrare nel sistema. Per ogni tipo di entità (un sensore numerico, un booleano, una luce, un entità di tipo climate, ecc) si può creare una lista di entità sotto lo stesso macro-parametro che rispecchierà esattamente il

```
- name: "Smartlink"
  type: tcp
  host: 10.20.95.88
  port: 502
  sensors:
    - name: "Contattore Gen serv"
      unique_id: "00002"
      scan_interval: 30
      address: 14240
      slave: 1
    - name: "Contattore Office"
      unique_id: "00010"
      scan_interval: 30
      address: 14200
      slave: 2
    - name: "PC1 Power"
      unique_id: "1011"
      scan_interval: 30
      address: 3053
      slave: 163
      data_type: float32
      precision: 2
      device_class: power
      unit_of_measurement: W

- name: "Comix"
  type: tcp
  host: 10.20.95.135
  port: 502
  sensors:
    - name: "General Active Power"
      unique_id: "0011"
      scan_interval: 30
      address: 0x0BF3
      slave: 1
      data_type: float32
      precision: 2
      device_class: power
      unit_of_measurement: kW
    - name: "General PF"
      unique_id: "0014"
      scan_interval: 30
      address: 0x0C0B
      slave: 1
      data_type: float32
      device_class: power factor
```

Figura 51 YAML di configurazione dell'integrazione Modbus

tipo: nell'esempio riportato in *Figura 51* sotto alla voce "sensors" si sta integrando una lista di sensori numerici, ognuno identificato dal carattere "-". Per ogni sensore è quindi necessario parametrizzare le specifiche sia per estrarre il dato dal dispositivo Modbus, sia per integrarlo nel sistema.

Nell'esempio sono stati parametrizzati:

- Name: rappresenta il nome che l'entità otterrà una volta integrata (nel caso di "PC1 Power", l'entità risultante sarà "sensor.pc1_power")
- Unique_id: un identificativo univoco che consente di distinguere tra loro le entità in caso di nome uguale. L'entità può essere gestita anche senza unique_id ma con limitazioni ed warning continui. Nel nostro caso si è scelto di seguire una numerazione crescente, differenziata per tipo di parametro integrato
- Scan_interval: intervallo temporale in secondi per interrogare i dispositivi; Modbus instaura infatti una comunicazione master-slave, dove il master interroga a intervalli regolare tutti i dispositivi slave che rispondono con il loro stato
- Address: L'indirizzo del registro dove il dato è contenuto. In base al dispositivo che si sta contattando questo può essere passato in formato decimale o esadecimale.
- Slave: ID Modbus del dispositivo all'interno della rete
- Data_type: indica il tipo di dato che risiede nel registro. È fondamentale nelle situazioni in cui il dato occupa più di un registro in quanto definisce la lunghezza in bit del dato. Ad esempio indicando un "float32" il sistema andrà leggere il registro indicato nella configurazione e il successivo (ogni registro Modbus contiene 16 bit).
- Precision: indica le cifre decimali da riportare nell'entità una volta integrata
- Device_class: indica la classe del dispositivo o entità in Home Assistant. Impostando la classe il sistema preconfigura una serie di parametri come ad esempio l'icona da mostrare nell'interfaccia grafica
- Unit_of_measurement: l'unità di misura da assegnare al dato

Oltre a questi parametri è possibile specificare molti altri parametri opzionali in base al sistema e all'informazione che si ha davanti; un esempio di parametro spesso trascurato che in alcuni casi rende la comunicazione fallace riguarda l'endianess, ossia l'ordine degli indirizzi nei casi in cui il dato sia contenuto in più di un indirizzo Modbus: poiché questo protocollo lascia molta libertà ai costruttori su come organizzare la comunicazione, non sempre ci si trova davanti alla stessa codifica del dato.

Completata la configurazione dell'integrazione e riavviato il sistema, si hanno a disposizione tutte le entità relative a tutte le grandezze misurate dal sistema di monitoraggio, con storicizzazione dei dati nel database di Home Assistant e possibilità di richiamarle per la configurazione dell'interfaccia grafica.

L'interfaccia grafica è stata costruita con due schermate principali differenti: una rispecchia il quadro elettrico e vi associa i valori real-time, nell'altra invece è stato ricostruito uno schema funzionale dell'impianto elettrico. Entrambe sono state costruite utilizzando la card nativa di Home Assistant "picture-element" che permette di impostare un'immagine di sfondo e sovrapporci elementi di varia natura: Nella schermata "Quadro Elettrico" sono stati inseriti elementi "label" per mettere in risalto i nomi dei circuiti presenti nel quadro ed elementi state-label che mostrano in tempo reale la potenza passante in ogni circuito.



Figura 52 Dashboard del quadro elettrico generale

Nella pagina “schema funzionale” è stato invece riportato uno schema semplificato dell’impinato elettrico dove sono rappresentati tutti i principali circuiti con le sorgenti nella parte superiore dello schema e scendendo vengono rappresentati tutti i carichi. Ogni elemento è collegato con una freccia il cui verso segue dinamicamente il flusso della potenza (in particolare per quanto riguarda il generale e lo storage). In questo caso, oltre all’informazione sulla potenza impegnata dal circuito è stato riportato anche lo stato dell’interruttore, con un’icone di manutenzione se risulta aperto in seguito all’intervento di un operatore, una “X” rossa nel caso di intervento della protezione.

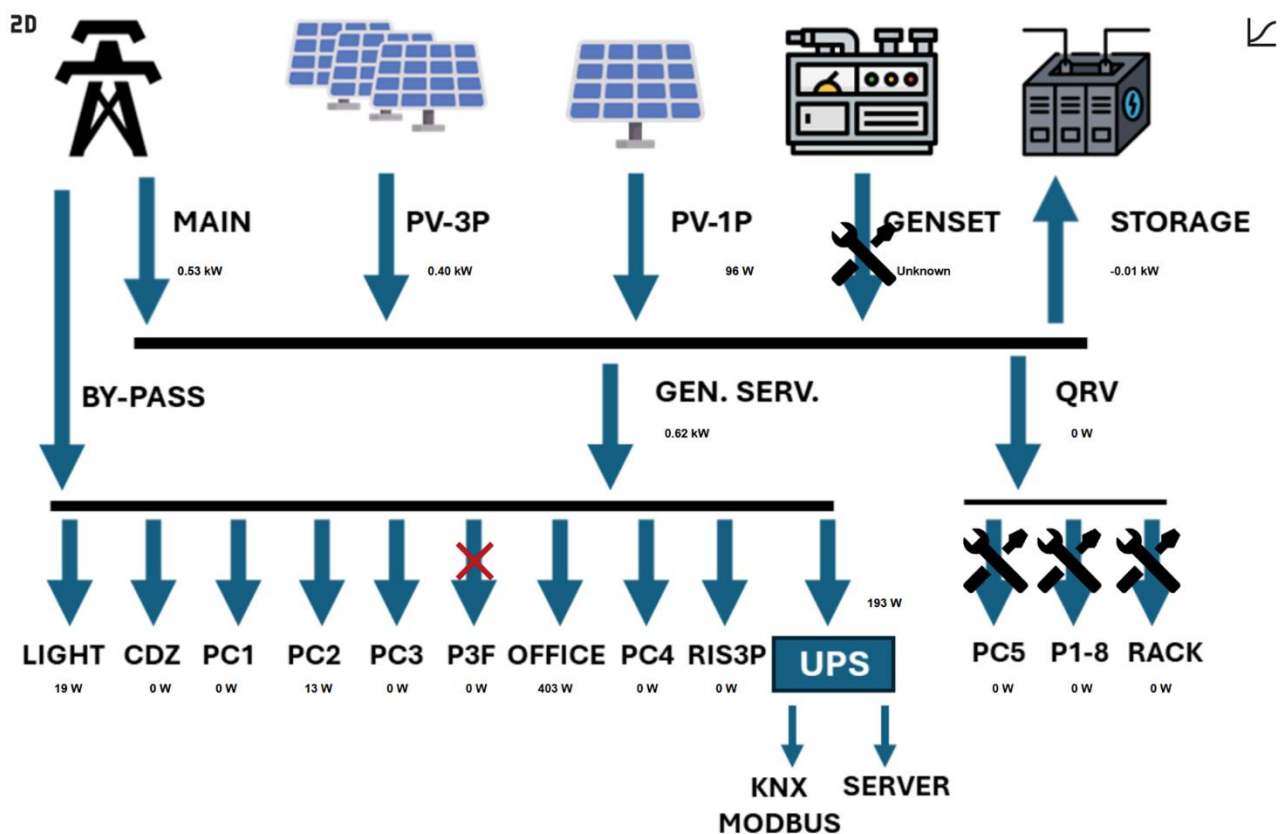


Figura 53 Dashboard "schema funzionale"

Da questa pagina, cliccando sul circuito di interesse, si accede a pagine di dettaglio per la visualizzazione degli andamenti storici di potenza, correnti e tensioni totali e per singola fase su grafici navigabili. Per la realizzazione di questa scheda di dettaglio è stata utilizzata l’integrazione per interfaccia grafica “plotly”.



Figura 54 Dashboard della storicizzazione

Tutti i dati raccolti dal sistema sono infine scaricabili in formato csv per un'esportazione in sistemi terzi.

3.2 Realizzazioni di impianti domotici: confronto tra sistemi tradizionali e di nuova generazione

Una delle modalità migliori per poter valutare e confrontare differenti tecnologie in competizione tra loro è probabilmente quella dell'approccio pratico. Uno degli obiettivi dello studio della building automation presentato in questo elaborato è stato quello di comprendere quanto le nuove tecnologie fossero competitive rispetto a quelle che possiamo definire proprie della domotica tradizionale. Infatti, la domotica di nuova generazione si presenta immediatamente come una tecnologia economicamente più accessibile rispetto ai tradizionali sistemi cablati ma nella maggior parte dei casi viene associata a prodotti plug and play e difficilmente integrabili fra loro, soprattutto se vengono adottate soluzioni multi-marchio (scelta spesso obbligata se si vogliono coprire funzioni domotiche). Si è voluto studiare quindi quanto la nuova generazione di prodotti e soluzioni sia matura e adatta a sostituire quella tradizionale, e quanto e se la riduzione dei costi stimata risulti un calo di performance.

In questo capitolo si vogliono portare due esempi di casi studio simili, presi come riferimento, uno sviluppato con tecnologie "tradizionali" (sistema KNX) e uno con tecnologie di nuova generazione al fine di poter esplicitare punti di forza dell'uno e dell'altro sistema.

3.2.1 Impianti domotici tradizionali: un appartamento in KNX

In questo primo caso studio verrà descritto un sistema domotico realizzato per un appartamento di medio-grandi dimensioni con tecnologia KNX. L'appartamento è composto da tre camere da letto, tre bagni, uno studio, un locale lavanderia, una sala lettura, cucina e un unico ambiente che unisce ingresso, sala da pranzo e salone. Gli impianti dell'appartamento sono completamente alimentati da energia elettrica utilizzando una pompa di calore per riscaldamento e raffrescamento a servizio di sei serpentine per il riscaldamento e il raffrescamento a pavimento e una piccola unità di trattamento aria che alimenta una serranda per ogni stanza. Una seconda pompa di calore si occupa invece della produzione di acqua calda sanitaria. L'appartamento è stato sottoposto a intervento di ristrutturazione completa che ha concesso grande libertà nelle scelte impiantistiche domotiche.

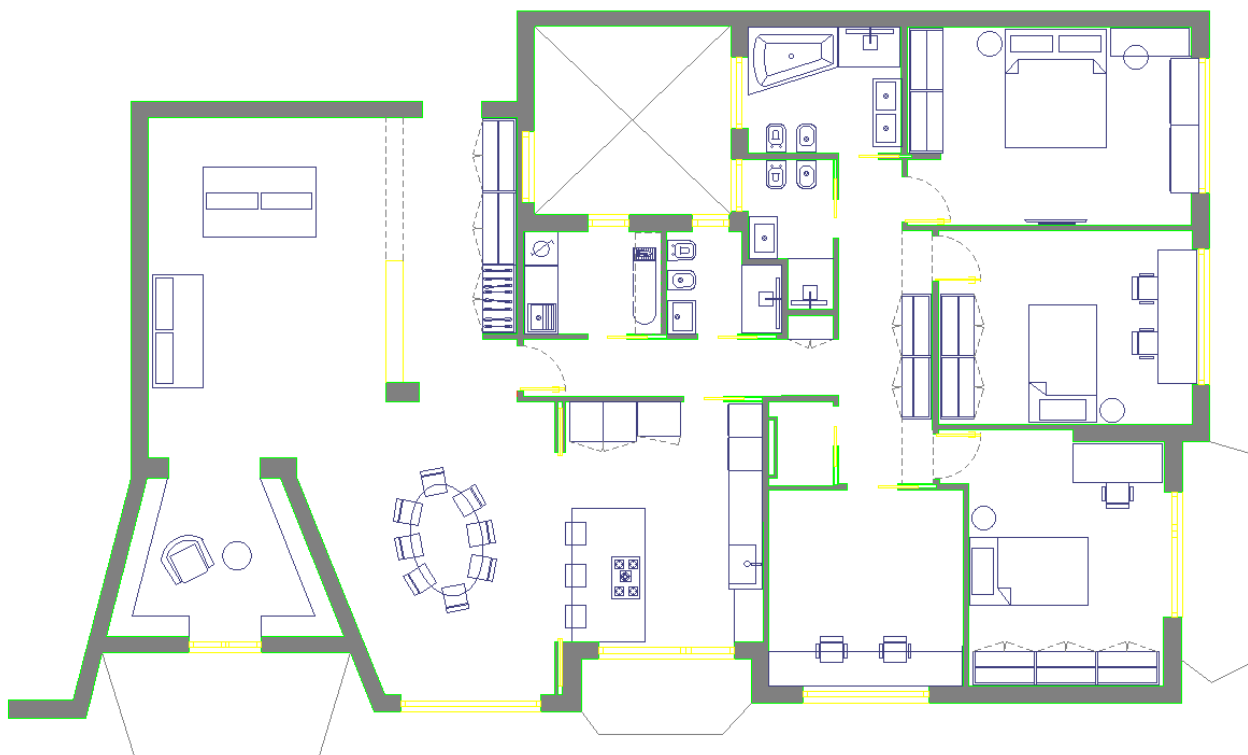


Figura 55 Pianta dell'appartamento

Le funzioni coperte dal sistema sono le seguenti:

- Gestione dell'illuminazione in modalità dimming
- Gestione dell'illuminazione in modalità RGBW per i bagni
- Gestione dell'impianto di climatizzazione
- Motorizzazione delle tapparelle
- Controllo carichi

La topologia dell'impianto KNX è costituita da due linee Twisted pair che collegano un totale 70 di dispositivi, 34 nella prima e 36 nella seconda compreso l'accoppiatore di linea. A completare l'architettura un supervisore svolge anche la funzione di gateway KNX/IP.

L'hardware installato per coprire le differenti funzioni integrate nel sistema è variegato. Per quanto riguarda l'illuminazione, nei punti luce in cui è stata prevista una regolazione del flusso luminoso sono stati utilizzati direttamente dei driver PWM per LED della MeanWell, comprensivi di alimentatore e comunicanti nativamente in KNX, posizionati in controsoffitto a ridosso dell'apparecchio illuminante e degli attuatori dimmer KNX Blumotix BXM04 a 4 canali con regolazione in PWM installati a valle degli alimentatori 24V, mentre per i bagni, dove è stata prevista un'illuminazione RGBW, sono stati installati attuatori dimmer a 4 canali dedicati BXDM-04 sempre della Blumotix posizionati nel controsoffitto del corridoio.

Diversi attuatori multifunzione BX MFB sempre dello stesso marchio a 12, 8 e 4 canali gestiscono invece i punti luce con controllo on/off (ad esempio faretti e sottopensili) e la movimentazione delle tapparelle, mentre i carichi (lavatrice, asciugatrice, lavastoviglie, forno elettrico, piastra a induzione, frigo bar e due prese) vengono controllati tramite attuatore per carichi BX ACT04. Infine, per la termoregolazione è stato utilizzato il controllore di circuiti di riscaldamento e raffrescamento dell'ABB HCC-S2-2.2.1 e un attuatore BX ACT12 per il controllo delle valvole delle singole serpentine. Per i comandi manuali si è scelto di affidarsi principalmente a delle eleganti tastiere capacitive a sfioro native KNX con aggiunta di bilancieri e pulsanti sempre comunicanti KNX installati in punti più periferici o unitamente alle tastiere quando queste non riuscivano a coprire tutte le funzioni di comando desiderate. In ogni stanza è stato installato anche un termostato ambientale BX-QR07 comunicante in KNX per la gestione dell'accensione e lo spegnimento della climatizzazione o della sua modalità



Figura 56 termostato ambientale BX-QR07

boost, la modifica dei setpoint di stanza e la visualizzazione della temperatura attuale. La presenza di doppio terminale di emissione in ogni stanza ha permesso infatti di gestire la climatizzazione in modo da massimizzare il confort termico: la stanza viene climatizzata principalmente tramite il pavimento radiante ma, se viene abilitata la modalità boost, una differenza tra temperatura attuale e set-point maggiore di 2°C attiva le bocchette dell'aria per una climatizzazione rapida dell'ambiente.

Il sistema è stato quindi programmato in ETS collegando ogni elemento di comando al relativo attuatore tramite indirizzi di gruppi alberati su tre livelli: il primo livello individua la funzione (illuminazione, controllo carichi, motorizzazioni tapparelle, illuminazione RGBW,

condizionamento e scenari), al secondo livello è stata effettuata una suddivisione per locali mentre al terzo ed ultimo troviamo i singoli indirizzi.

A conclusione della descrizione dell'hardware utilizzato vi è il supervisore Blumotix BX-MS02 che svolge allo stesso tempo il ruolo di gateway IP e permette di assumere il pieno controllo dell'intero impianto da smartphone interfacciandosi con l'applicazione "Krim". È un dispositivo da quadro dotato di interfaccia KNX, collegandolo direttamente al bus TP, e connessione ad internet tramite router domestico con collegamento cablato in ethernet. Per



Figura 57 schermata principale del supervisore

l'accesso da remoto è stato utilizzato un servizio di DDNS, configurato nel router, per evitare la richiesta di IP pubblico statico, con collegamento in https e credenziali di accesso per evitare l'accesso ad estranei. La configurazione del supervisore riguarda prevalentemente la realizzazione dell'interfaccia grafica e viene svolta utilizzando il software apposito "New Sentiero". Il file di configurazione viene poi esportato in formato ".sqlite" e caricato nel dispositivo tramite scheda micro-SD. L'interfaccia grafica è stata organizzata in una schermata principale con la riproduzione in pianta della casa dove sono stati inseriti i comandi principali: accensione e spegnimento generale delle luci per l'intero appartamento e per le singole stanze (si tratta sempre di accensioni generali in quanto ogni stanza ha più di un gruppo di controllo), motorizzazione generale delle tapparelle e link di navigazione verso le pagine delle singole camere, della gestione dell'impianto termico e del controllo carichi.

A titolo di esempio si riporta in *Figura 58* la pagina dedicata ad una singola stanza dalla quale è possibile controllare tutta la dotazione impiantistica presente: doppia motorizzazione per tapparelle (finestra e portafinestra), tre accensioni e regolazione di altrettante trip led per l'on/off e la dimmerazione, l'on/off della luce del balcone e una sezione a sinistra per la gestione del clima dove è possibile visualizzare temperatura e umidità e regolare il setpoint della stanza estivo e invernale.

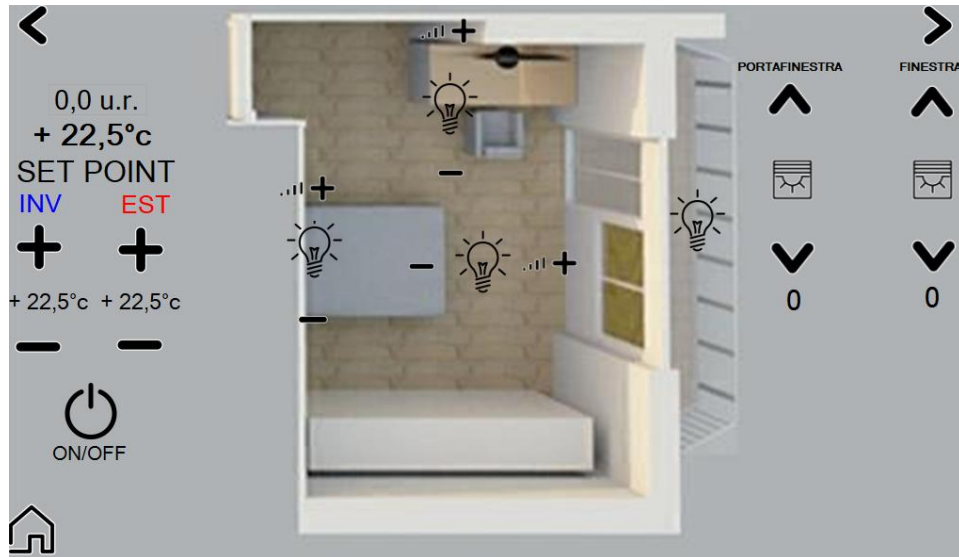


Figura 58 Dashboard singola stanza

Nella pagina di gestione del carico è possibile visualizzare le temperature delle singole stanze, i parametri di funzionamento dell'impianto a pavimento radiante e il controllo base dell'impianto (inversione estate/inverno, selezione del set-point generale e avvio e spegnimento).



Figura 59 Dashboard di gestione dell'impianto termico

3.2.2 La domotica di nuova generazione: un appartamento con tecnologia open source

Il caso studio riportato in questo paragrafo riguarda la domotizzazione di un appartamento di dimensioni medio-grandi tramite l'utilizzo di tecnologie moderne wireless e a basso costo. Tale appartamento è composto da tre camere da letto, due bagni, cucina, sala da pranzo e ingresso, un corridoio e due balconi, coprendo una superficie calpestabile di 130 m^2 circa. Utilizza per il riscaldamento un impianto autonomo con una caldaia a gas e vari termosifoni come elementi terminali e la stessa caldaia viene utilizzata per la produzione dell'acqua calda sanitaria, mentre per il raffrescamento estivo è previsto l'utilizzo di un climatizzatore per ogni ambiente fatta eccezione per i bagni, la cucina e il corridoio. L'obiettivo dell'intervento è stato quello di domotizzare l'intero appartamento riducendo al minimo gli interventi e le modifiche a quanto già esistente, senza prevedere quindi operazioni di ristrutturazione o di rifacimento di alcun tipo [43].

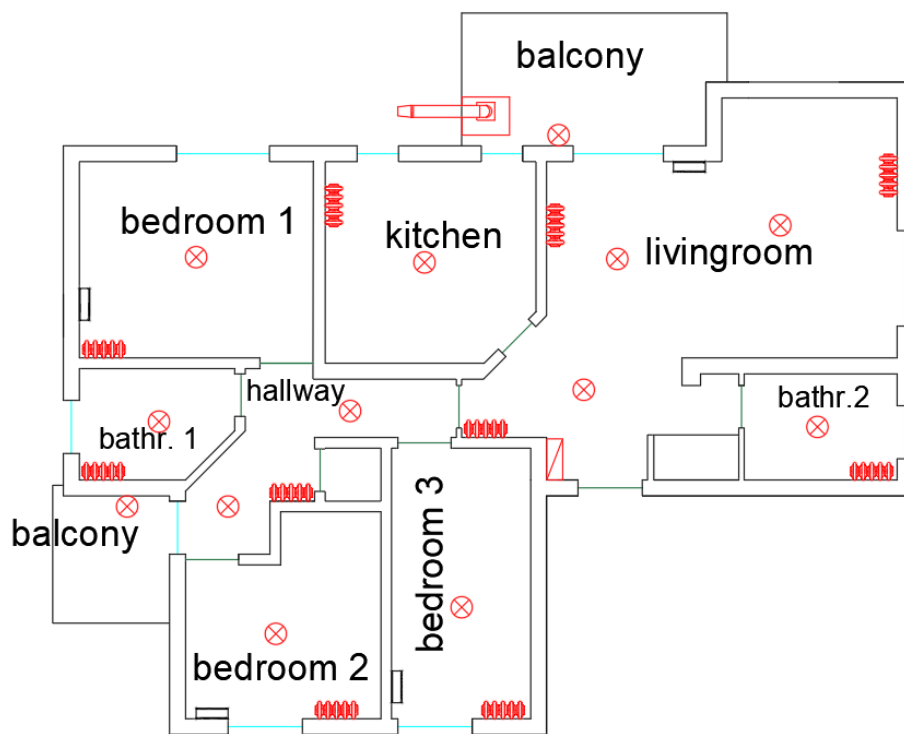


Figura 60 Pianta appartamento

L'intervento ha previsto l'introduzione delle seguenti funzioni:

- Digitalizzazione dell'impianto di illuminazione
- Digitalizzazione e controllo automatico dell'impianto di riscaldamento
- Digitalizzazione e controllo della produzione dell'acqua calda sanitaria
- Digitalizzazione e controllo automatico del raffrescamento
- Monitoraggio dei consumi elettrici

- Monitoraggio degli infissi perimetrali

Prima di descrivere nel dettaglio le modalità di implementazione delle varie funzioni, sia dal punto di vista hardware che software, è utile comprendere l'architettura scelta per il sistema. Il cuore dell'impianto domotico realizzato è il server centrale: il carattere low-cost dei dispositivi di nuova generazione e le tecnologie di comunicazione utilizzate non consentono di attribuire ai dispositivi di campo un'elevata capacità calcolo ed elaborazione, rendendo i sistemi a intelligenza concentrata la soluzione più percorribile.

Il server è collegato al router domestico con una connessione cablata in Ethernet (si potrebbe collegare anche tramite WiFi), potendo accedere in questo modo sia alla rete IP locale (LAN) sia ad internet tramite la connessione dell'appartamento, mentre, utilizzando un dongle Zigbee (gateway Zigbee/seriale), genera a sua volta una rete locale dove assume il ruolo di coordinatore. I dispositivi di campo in grado di gestire una connessione Zigbee si collegano quindi al server sfruttando la rete appositamente creata. Il protocollo Zigbee consente di creare delle reti magliate (mesh): la funzione di nodo attivo (nodo router, in grado di instradare la comunicazione verso altri dispositivi) è tuttavia disponibile solo per i dispositivi con alimentazione diretta, mentre quelli alimentati a batteria possono svolgere solo il ruolo di end-device. La scelta di adottare questa tecnologia come soluzione principale per la comunicazione con i vari dispositivi è dovuta anche a questa possibilità, permettendo di superare agevolmente e senza eccessivi oneri economici le problematiche relative ad un eventuale mancanza di copertura della rete WiFi in alcune zone dell'appartamento.

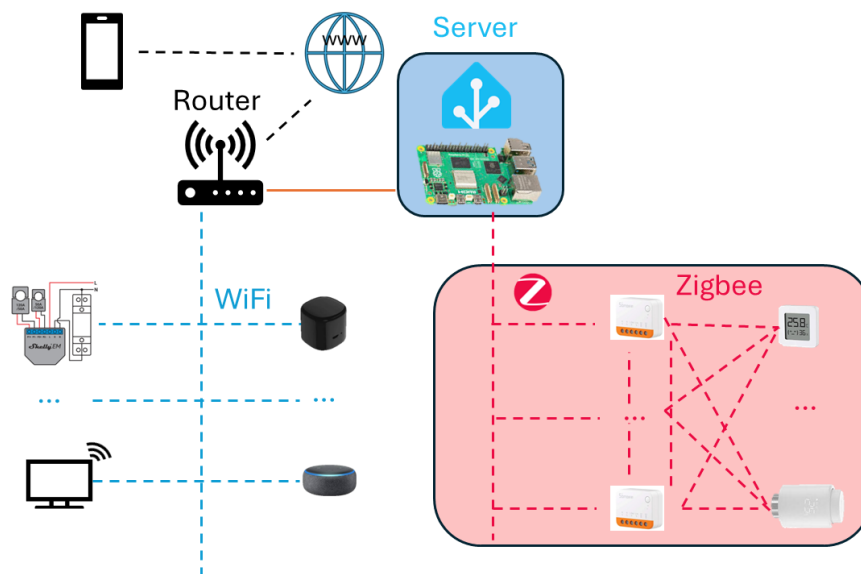


Figura 61 Architettura sistema domotico

Dove non è stato possibile optare per dispositivi Zigbee la comunicazione è stata affidata alla rete WiFi domestica. L'utente può infine collegarsi al server tramite un qualsiasi browser

Internet o tramite applicazione per smartphone (Android e IOS) utilizzando la stessa rete WiFi locale, se all'interno dell'abitazione, o da remoto puntando all'URL assegnato all'abitazione, acquistato appositamente e collegato al servizio gratuito CloudFlare che si occupa della risoluzione dei DNS, della gestione dei certificati TLS e della protezione dai più comuni attacchi hacker.

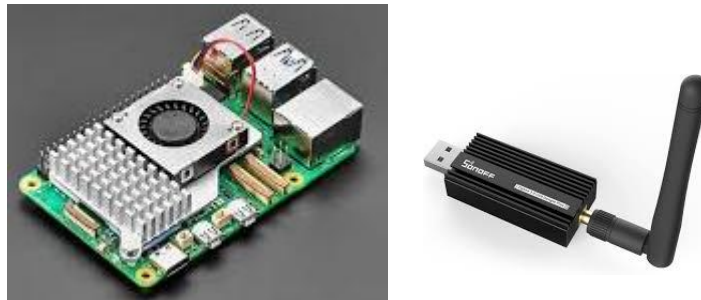


Figura 62 Raspberry Pi 5 a sinistra e Sonoff Zigbee dongle a destra

Il server è stato realizzato utilizzando un Raspberry Pi 5 completo di dissipatore attivo del calore, case protettivo e scheda microSD da 246 GB, collegato all'alimentazione elettrica tramite alimentatore da 5V e 3A. A completare l'hardware è stato collegato a una delle sue porte USB un dongle Zigbee della casa produttrice Sonoff, abilitando così il supporto a questo canale di comunicazione. Il Raspberry è stato equipaggiato con sistema operativo Raspberry Pi OS, distribuzione Debian ottimizzata per l'omonimo dispositivo, e tramite l'applicativo Docker Compose sono state installate tutte le componenti software necessarie al funzionamento del sistema, ognuna in un container docker dedicato [44]:

- **Home Assistant** - Primo per importanza e centralità nel sistema. Si è scelto di utilizzare la versione “Core” dell'applicativo in modo da rendere la sua esecuzione più leggera e la gestione degli altri software più libera e ordinata (in alternativa si poteva installare direttamente la versione OS o la “Supervised” affidando ad Home Assistant stesso la gestione di software terzi sottoforma di add-on).
- **CloudFlared** - applicativo che permette una connessione da remoto sicura al server creando un tunneling verso i servizi di CloudFlare. Questa soluzione risulta attualmente la più affidabile in termini di sicurezza e consente di bypassare ogni tipo di configurazione del router domestico (quali port forwarding e impostazione di un DNS dinamico) rendendo l'installazione indipendente dalla tipologia di quest'ultimo (con alcuni router come, ad esempio, quelli di Sky o Fastweb la procedura potrebbe essere complicata da policy estremamente rigorose delle stesse aziende).
- **Zigbee2MQTT** - applicativo in grado di interfacciarsi con i più comuni dongle Zigbee traducendo la comunicazione nel protocollo MQTT. Consente di gestire, tramite

interfaccia grafica esposta su una web page locale, il “join” di nuovi dispositivi, la loro configurazione, gli aggiornamenti OTA (Over The Air) e di visualizzare log e mappa della rete.

- **Mosquitto** - è un broker MQTT, ossia il punto centrale della comunicazione con questo protocollo. Gestisce la comunicazione tra tutti i client e agisce come men-in-the-middle. Risulta fondamentale sia per la comunicazione con i dispositivi Zigbee, in quanto tradotta in MQTT da Zigbee2MQTT, sia per l'integrazione di ulteriori dispositivi che utilizzano questo protocollo per la comunicazione WiFi. Tramite l'installazione dell'integrazione “MQTT” anche Home Assistant stesso diventa un client di Mosquitto broker.

Passiamo quindi ad analizzare le funzionalità abilitate descrivendo al contempo i dispositivi smart coinvolti:

- **Illuminazione** – la gestione dell'illuminazione è stata affidata ai dispositivi “ZB mini R2” marchiati Sonoff. Sono degli switch comunicanti in Zigbee dalle dimensioni estremamente ridotte che consentono spesso un'installazione agevole all'interno delle comuni scatole 503 dietro ai frutti o direttamente in scatola di



Figura 63 Sonoff ZB mini R2

derivazione. Il loro cablaggio prevede il collegamento alla fase e al neutro per l'alimentazione del dispositivo stesso, il collegamento verso la lampada da controllare e il collegamento verso l'interruttore, il deviatore (lato lampada), o i pulsanti originariamente collegati al circuito della lampada. Cablati e configurati correttamente infatti possono gestire tutti e tre le tipologie di comando comunemente presenti nelle abitazioni senza rinunciare al comando manuale stesso. Ne sono stati installati 13, uno ogni punto luce, così da creare anche un'ottima base per la rete mesh Zigbee. Dove era presente un unico punto di accensione tramite interruttore il dispositivo è stato installato direttamente nella scatola 503 mentre per i punti luce gestiti da più pulsanti è stato installato in sostituzione del relè già presente (in alternativa si potrebbe mantenere il relè e interporre il dispositivo tra questo e i pulsanti). Per quanto riguarda le funzioni logiche abbinate all'impianto di illuminazione l'unica da segnalare è lo scenario di OFF generale per spegnere tutte le luci in un solo comando.

- **Riscaldamento** – la digitalizzazione dell’impianto di riscaldamento è stata ottenuta utilizzando più dispositivi al fine di raggiungere livelli prestazionali elevati. Ogni termosifone è stato equipaggiato con una testa per valvola termostatica “TRVZB” della casa produttrice Sonoff. Questi dispositivi comunicano in Zigbee e sono alimentati a batteria: assumono quindi il ruolo di “end device” all’interno della rete (senza espandere la mesh) per aumentare il più possibile la loro autonomia, raggiungendo circa un anno di funzionamento prima della sostituzione delle batterie. Possono essere installate su differenti tipologie di valvole per termosifoni, dispongono di un elegante display per la visualizzazione della temperatura dell’ambiente e possono essere controllate manualmente tramite una ghiera girevole alla loro estremità. Dispongono di un sensore di temperatura integrato per lavorare in modalità stand-alone ma, poiché la misurazione della temperatura risulterebbe falsata dalla vicinanza al termosifone stesso, si è scelto di abbinarle a un sensore di temperatura esterno “Mi Temperature and Humidity Monitor” della Xiaomi. Il sensore comunica nativamente tramite Bluetooth ma tramite l’installazione di un firmware custom è stato convertito per supportare una comunicazione zigbee. Per favorire il suo posizionamento ottimale rispetto alla distribuzione del campo di temperatura all’interno dell’ambiente è anch’esso alimentato a batterie e anche in questo caso il ruolo assunto all’interno della rete è di “end device”.



Figura 65 Sonoff TRVZB



Figura 64 Xiaomi MI TH

La caldaia a gas è stata infine digitalizzata sostituendo il vecchio termostato con un termostato prodotto da “DYLESS” in grado di comunicare con la caldaia tramite protocollo OpenTherm (protocollo specifico per la comunicazione tra caldaie e termostati). Questa sua caratteristica lo rende molto particolare in quanto permette di gestire non solo l’accensione e lo spegnimento ma



Figura 66 DYLESS termostato

anche parametri aggiuntivi come temperatura di produzione dell’acqua calda sanitaria e dell’acqua calda per il riscaldamento. Il dispositivo comunica in MQTT sfruttando l’infrastruttura WiFi già presente. Per il controllo del riscaldamento invernale è stato sviluppato un algoritmo di automazione molto elaborato al fine di gestire in maniera capillare e autonoma ogni singola unità terminale. Innanzitutto, è

possibile gestire in modalità manuale l'accensione e lo spegnimento dell'intero sistema, che se abilitato può funzionare esclusivamente in modalità automatica. In tale modalità ogni terminale si autogestisce sulla base della temperatura target dell'ambiente servito impostata dall'utente potendo assumere uno dei seguenti stati: "heating" se è in funzione, "idle" se la valvola è stata chiusa a seguito del raggiungimento della temperatura desiderata nell'ambiente, "auto-off" o "off" se invece è spento. È stato necessario creare due stati di "off" in quanto è stata abilitata la funzione di esclusione degli ambienti dal riscaldamento che permette all'utente di selezionare gli ambienti dell'abitazione da riscaldare evitando di sprecare energia climatizzando stanze non utilizzate. Lo stato di "auto-off" rappresenta allora quei termosifoni spenti dal sistema a seguito dell'off generale dei riscaldamenti mentre lo stato di "off" viene assunto dai terminali esclusi dall'automazione. Le valvole in "auto-off" vengono riattivate in automatico all'accensione dell'impianto a differenza di quelle in "off" che necessitano l'intervento dell'utente. A sistema spento le valvole vengono disattivate in modo da risparmiare il più possibile la loro movimentazione quando non necessaria così da dilatare il più possibile la durata delle batterie.

- **Condizionamento estivo:** per la gestione del condizionamento estivo è stato necessario digitalizzare 4 condizionatori split tradizionali non dotati di sistema di comunicazione. Per poter digitalizzare un condizionatore tradizionale serve un dispositivo in grado di comandarlo e uno per ricevere segnali di feedback sul suo stato di funzionamento. Per il controllo la strategia più efficace è quella di digitalizzare direttamente il telecomando IR utilizzando il dispositivo Broadlink RM4c in grado di apprendere i codici dal telecomando originale e replicarli o più comodamente caricare i codici dalle librerie online se disponibili per il modello in oggetto. Per il feedback di stato è necessario invece un dispositivo di power monitoring così da ricavare lo stato di funzionamento dal profilo di assorbimento dell'apparecchio; è stato utilizzato a tale scopo uno Shelly 1PM collegato in serie al condizionatore lato alimentazione. A livello di automazione è stato realizzato, su richiesta dell'utente, uno scenario di on e off generale di raffrescamento dell'intero appartamento pensato per funzionare con le porte delle singole stanze aperte, mentre per il funzionamento ad ambienti isolati si è scelto di mantenere accensione e spegnimento manuali lasciando ai condizionatori l'onere di



Figura 68 Broadlink rm4c



Figura 67 Shelly 1PM

gestire la temperatura all'interno dell'ambiente. Come funzione aggiuntiva è previsto lo spegnimento automatico dell'apparecchio se viene rilevata l'apertura della finestra.

- **Sistema perimetrale:** è stato installato un sistema di rilevamento dello stato degli infissi perimetrali (finestre, porte finestre e porta d'ingresso), utilizzando i contatti magnetici della Xiaomi "Mi door and Window Sensor 2", dispositivi alimentati a batteria e comunicanti in zigbee. Il loro funzionamento è banale: espongono uno stato binario aperto/chiuso in base alla vicinanza del modulo magnetico al corpo principale del dispositivo. Tale sistema non può essere considerato un sistema antintrusione in quanto non rispetta i requisiti delle normative CEI 79-3 ed EN 50131.
- **Monitoraggio energetico:** oltre al monitoraggio in potenza ed energia dei singoli condizionatori è stato installato un dispositivo per il monitoraggio dei consumi generali dell'unità nel quadro elettrico principale. Il dispositivo scelto è un Shelly EM installato con toroide e inserzione diretta per il rilevamento della tensione e l'alimentazione del dispositivo stesso. Oltre a permettere la visualizzazione dei consumi istantanei e storici è stata elaborata un'automazione per inviare una notifica sugli smartphone di chi è in casa avvisando l'utente del superamento di una soglia in potenza selezionabile tramite interfaccia grafica, pensata per rispecchiare la potenza contrattuale e fornire un alert prima del distacco dal contatore.



Figura 69 Mi Door sensor 2

Come anticipato, l'intero sistema è gestito da Home Assistant; al suo interno sono stati create entità "person" in numero uguale a quello degli inquilini dell'appartamento ottenendo in automatico altrettanti utenti con proprie credenziali alla piattaforma, più un utente amministratore con permessi di accesso totale al sistema per la gestione e la configurazione. Per gli utenti semplici è stato abilitato l'accesso alle sole pagine grafiche per l'utilizzo quotidiano della piattaforma. La pagina grafica principale è stata pensata per un accesso comodo alle funzionalità di utilizzo quotidiano come l'accensione e lo spegnimento di luci, condizionatori e termosifoni e una visualizzazione real-time di sintesi dello stato dell'abitazione (temperature degli ambienti, stato degli infissi, stato degli apparecchi controllati). È stata generata una piantina dell'appartamento utilizzando il software "SweetHome3D" e caricata come immagine di background in una card "picture-element", sovrapponendovi come elementi "icon" o "image" tutte le entità di cui sopra. Tutte le entità



Figura 70 Dashboard principale del supervisore

Figura 71 Dashboard principale - comandi generali

sono state raggruppate per funzionalità e inserite in un blocco "conditional" per rimuovere dalla visualizzazione gli elementi di non interesse (ad esempio d'estate possono essere nascosti i termosifoni e di inverno i condizionatori). Tramite una pressione breve sulle icone è possibile comandare le entità ad esse correlate, con una pressione prolungata si accede invece a pagine di dettaglio. Nella stessa pagina, sotto la piantina, sono stati inseriti invece i

comandi generali e le informazioni sui consumi energetici.

Utilizzando la barra di navigazione in alto è invece possibile accedere alle pagine di servizio dedicate ai singoli sistemi tecnici. Si è scelto di realizzare una barra di navigazione personalizzata utilizzando le integrazioni custom per il front-end "Mushroom" e "card-mod",

la prima abilita nuovi elementi grafici mentre la seconda permette di modificare lo stile delle card applicando codice "css". Questa scelta si è resa necessaria per potere limitare l'accesso al sistema all'utente base, nascondendo i menu di navigazione nativi dell'applicazione che altrimenti avrebbero esposto dei collegamenti alle pagine di configurazione.

Nella pagina relativa al riscaldamento (identificata con l'icona della fiamma) è possibile gestire la caldaia sia per l'acqua calda sanitaria sia per il riscaldamento vero e proprio, presentando una schermata di sintesi di tutti i termosifoni con temperatura attuale dell'ambiente, temperatura di setpoint, stato del termosifone (sottoforma di icona) e stato delle batterie dei sensori di temperatura e umidità e delle valvole.

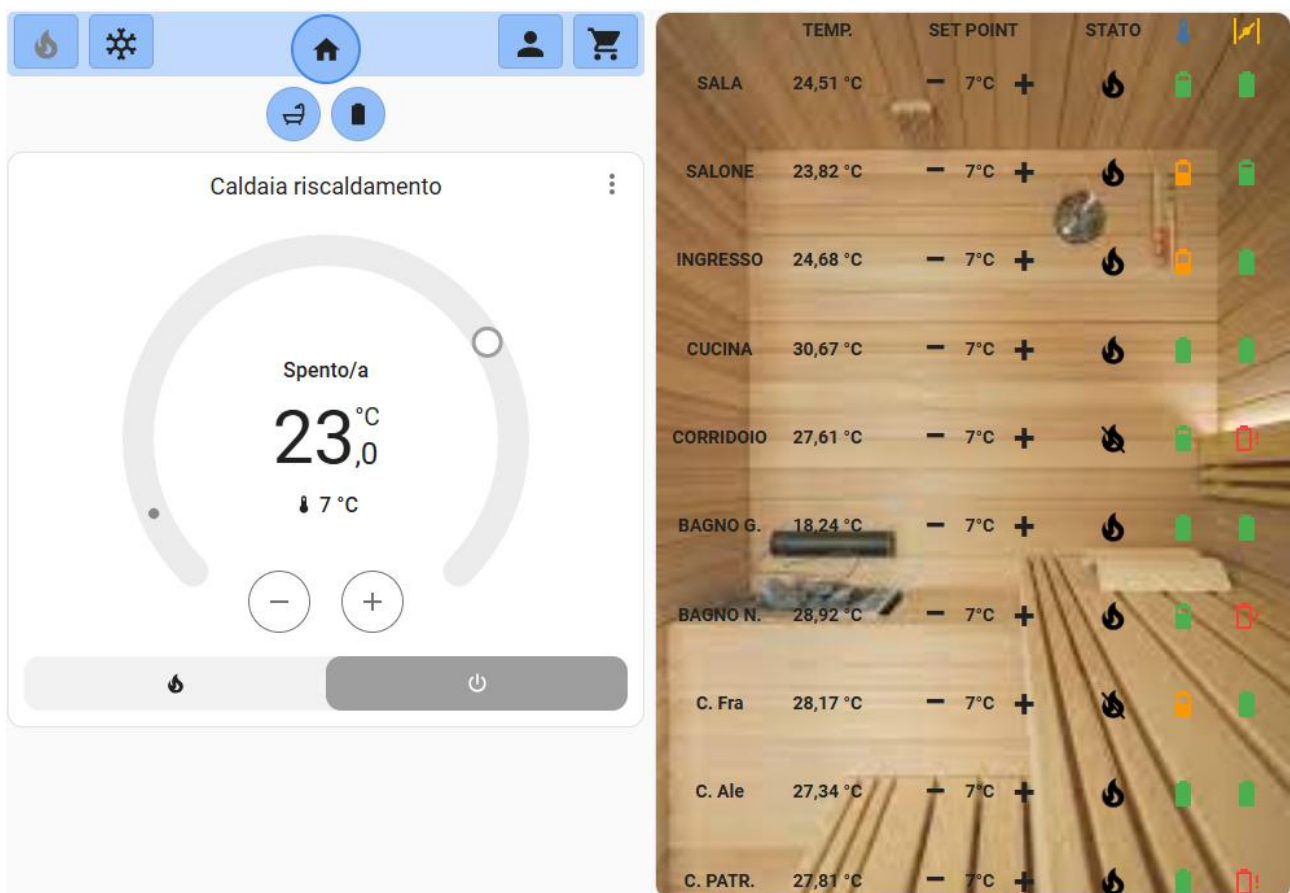


Figura 72 Dashboard di gestione del termico

Nella pagina dedicata al condizionamento invece sono presenti le schede di dettaglio dei singoli condizionatori, mentre altre due pagine extra sono state realizzate per visualizzare la posizione degli utenti (in casa, fuori casa, e la localizzazione su una scheda maps) in una e per gestire la lista della spesa nell'altra (entrambe generate su richiesta dell'utente).

Infine, è stata realizzata un'automazione di manutenzione che avvisa l'utente tramite notifica push sullo smartphone circa la necessità di sostituzione delle batterie dei singoli dispositivi.

3.2.3 Confronto

I due casi studio riportati, per quanto differiscano in parte nella dotazione dei sistemi tecnici a cui l'impianto domotico è asservito, possono essere confrontati dal punto installativo, dei dispositivi coinvolti, dell'impegno in ingegnerizzazione e programmazione richiesto e sicuramente dei costi e delle prestazioni. Per quanto riguarda gli aspetti installativi la differenza tra i due approcci è sostanziale: gli impianti KNX, basati su tecnologia BUS cablata, richiedono interventi profondamente invasivi in quanto è necessario predisporre passaggi cavi e adeguamento degli spazi a disposizione per i dispositivi di campo, risultando adeguati quasi esclusivamente a situazioni in cui è prevista una ristrutturazione interna dell'unità abitativa; la soluzione di nuova generazione invece, sfruttando tecnologia wireless per la comunicazione, rende l'installazione snella ed economica, richiedendo al più il passaggio di qualche conduttore di neutro nei corrugati dedicati a interruttori e relè per il controllo dell'illuminazione, aprendo la possibilità a installazioni "nascoste" che si adattano alla dotazione impiantistica esistente. Per quanto riguarda i dispositivi coinvolti nella digitalizzazione dei sistemi tecnici e tecnologici, sicuramente affidandosi a KNX si hanno a disposizione soluzioni di elevata qualità e prodotti di marchi affermati da decenni come leader del settore elettrico ed elettronico. Questo si riflette in un'affidabilità molto elevata e una diminuzione di guasti e disservizi (per quanto, trattandosi di dispositivi elettronici, va sempre tenuta in considerazione una probabilità di guasti infantili non nulla) da un lato, dall'altro ovviamente ci si trova di fronte a costi molto più ingenti (senza entrare troppo nello specifico si parla comunque di un ordine di grandezza di differenza) e un ingombro più marcato dovuto anche alla tendenza di utilizzo di dispositivi a più canali, proprio per limitare i costi. Sebbene la differenza in affidabile sia indubbia, va segnalato che dopo circa due anni di servizio non si segnalano guasti critici ai componenti domotici di nuova generazione utilizzati, ma solamente sporadici disaccoppiamenti nella comunicazione risolti con manovre di una manciata di minuti senza necessità di smontaggio. L'alimentazione a batteria è forse uno dei punti più sfavorevoli delle tecnologie wireless, per quanto si è riusciti a ridurre il tasso di cambio delle batterie con strategie di configurazione mirate, come, ad esempio, l'off delle valvole termostatiche a caldaia spenta e intervalli di campionamento della temperatura dilatati e basati su soglie di variazione dei valori monitorati, portando a circa un anno l'autonomia dei dispositivi. Un altro aspetto dove i due sistemi si differenziano maggiormente è quello legato all'ingegnerizzazione e programmazione del sistema. I sistemi KNX infatti

richiedo obbligatoriamente l'utilizzo di ETS come software di programmazione, il che include l'acquisto delle licenze e il coinvolgimento di personale specializzato, nonché tempistiche ampie e ore uomo impegnate non indifferenti. La soluzione di nuova generazione si affida a tecniche di programmazione note e linguaggi appartenenti alla cultura classica dei sistemi informatici, aprendo la possibilità al coinvolgimento di personale meno qualificato e all'automatizzazione di programmazioni di uso comune tramite l'utilizzo di template predefiniti. Infine, considerando l'aspetto economico, quanto detto finora rende evidente la differenza sostanziale in termini di costi a favore della domotica di nuova generazione, che può permettersi risparmi cospicui dal punto di vista dei materiali, sia dei dispositivi in sé che di cablaggi e supporti ai dispositivi stessi e dal punto di vista delle ore uomo impiegate nella programmazione. Questa economicità, tuttavia, non si evidenzia nella qualità e nell'efficacia delle funzioni espletate dal sistema, anzi la flessibilità e la possibilità di customizzazione offerte dai sistemi open source utilizzati consente di abilitare molte funzioni e integrazioni non contemplabili nei sistemi domotici tradizionali.

3.3 Applicazioni di Digital Twin

3.3.1 Digital Twin da modelli BIM: cabina MT-BT in duplice ambiente

Il Digital Twin è una tecnologia molto promettente nel panorama tecnico moderno ed è stato di conseguenza preso in considerazione da molte realtà e società nel panorama nazionale e internazionale. Nonostante sia possibile, sia dal punto di vista tecnico che normativo, sviluppare modelli di Digital Twin mono e bidimensionali, la sua declinazione in tre dimensioni può essere considerata il vero passo in avanti dal punto di vista tecnologico, differenziandosi sostanzialmente da soluzioni che possono risultare molto simili a sistemi SCADA o di supervisione avanzati. In questo contesto è possibile sfruttare differenti modelli tridimensionali più o meno complessi e completi ma, considerando il percorso ormai ampiamente delineato in direzione BIM per la nuova frontiera della progettazione architettonica e impiantistica, lo studio di tale tecnologia è stato per lo più incentrato su Digital Twin basati sull'integrazione dei sistemi IoT in modelli BIM. In questo modo è infatti possibile ereditare dal processo di progettazione, in particolare per strutture e infrastrutture di nuova costruzione, modelli già pronti, riducendo così sforzi e costi della realizzazione di Digital Twin, confinandoli all'integrazione dei sistemi IoT su modelli 3D. Inoltre, la ricchezza informativa contenuta nei modelli BIM permette di raggiungere risultati potenzialmente più avanzati e funzionalmente più completi.

Per lo studio di soluzioni di Digital Twin frutto dell'integrazione di sistemi IoT in modelli BIM sono state indagate due possibilità, sfruttando altrettante suite software pensate per la progettazione BIM: la suite della società italiana ACCA Software, specializzata nella progettazione impiantistica in ambiente BIM, e la nota multinazionale Autodesk, impegnata nella progettazione BIM tramite il potente software Revit.

Le due suite alternative sono state applicate allo stesso caso studio, al fine di ottenere un confronto sia sulla qualità del prodotto finale sia sulla facilità e versatilità nello sviluppo.

CASO STUDIO

Il caso studio preso in considerazione è una cabina di trasformazione MT-BT. La cabina può essere suddivisa in tre sezioni: Quadro MT di media tensione, trasformatori e gruppi di rifasamento e quadro BT di bassa tensione.

Il quadro MT è composto da cinque unità funzionali: l'arrivo dell'alimentazione, l'unità di misura, due unità di partenza verso i trasformatori e un'unità di partenza verso la cabina 1. Arrivo e partenze sono realizzate tramite interruttori WL-VCB e sezionatori sotto carico IM6S-TD entrambi da 24 kV affiancati da relè PRON-NA30 e PRON-NA016 (per i trasformatori), mentre l'unità di misura è composta da trasformatori amperometrici TA TF69P, voltmetrici VFB11 e moduli per il monitoraggio puntuale delle temperature a 8 canali MPT equipaggiato con sonde Pt100.

La sezione trasformatori è composta da due trasformatori abbassatori in parallelo da 800kVA ciascuno e rapporto di trasformazione 20/0,4kV, corredati da un gruppo di rifasamento a condensatori da 25kVAr.

Il quadro BT è composto da tre sbarre, una per ogni trasformatore una per la linea in continuità, da cui si diramano 13 partenze per le linee in bassa tensione. Ogni partenza è stata realizzata tramite interruttore magnetotermico della serie Compact NS equipaggiati con unità di controllo Micrologic 2.0 prodotti dalla Schneider Electric.

Per quanto riguarda il sistema di monitoraggio la cabina è equipaggiata con sistema cablato RS485 basato sul protocollo ModBus RTU e differenti gateway RTU/IP per l'accesso alla rete internet locale. Tale sistema mette a disposizione informazioni sugli stati degli interruttori tramite i relè per quanto riguarda la sezione MT e tramite contatto ausiliari per la sezione BT, temperatura dei punti di connessione delle unità funzionali, dei trasformatori e delle partenze in bassa tensione tramite sonde Pt100 convogliate verso un concentratore, parametri ambientali come temperatura e umidità della cabina, apertura della porta di

ingresso e rilevazione fumi. (Nella realizzazione dei Digital Twin l'accesso ai dati che è stato concesso a scopo sperimentale è stato limitato a qualche sensore e per intervalli temporali limitati a causa di restrizioni e vincoli autorizzativi).

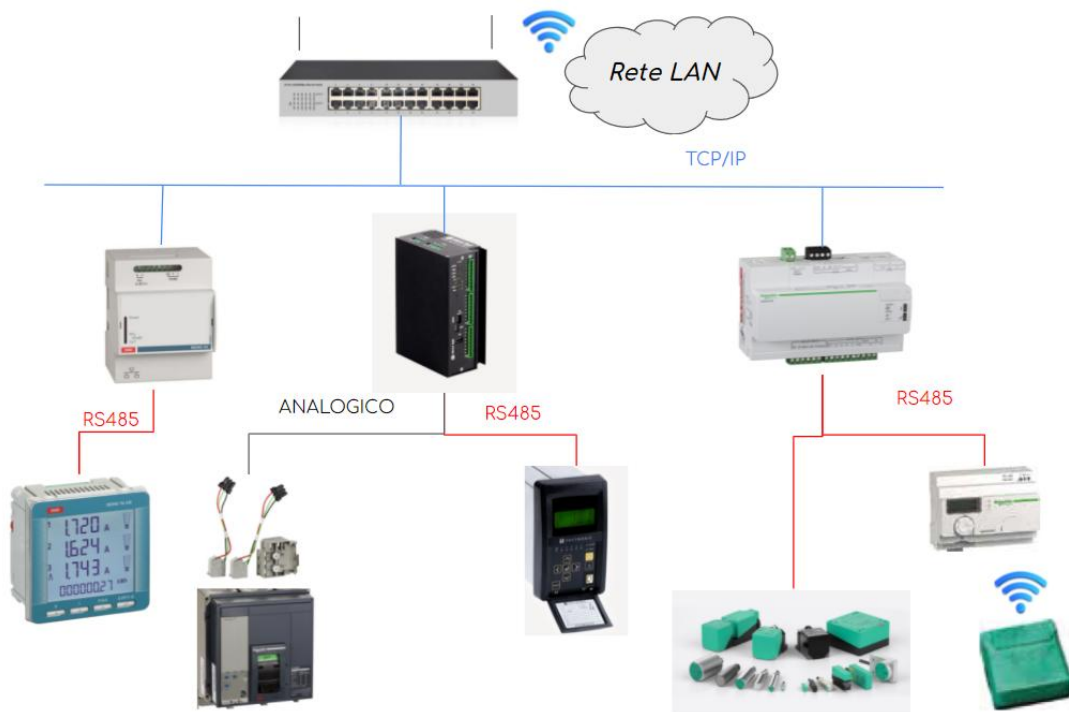


Figura 73 Architettura del sistema di monitoraggio della cabina MT/BT

AMBIENTE ACCA SOFTWARE

ACCA Software, grazie alla pubblicazione di numeri software di progettazione e di supporto per i professionisti è diventata negli anni un competitor all'altezza dei grandi marchi internazionali, almeno per quanto riguarda il mercato italiano, integrando nella sua suite strumenti pensati e ottimizzati per le normative italiane vigenti e offrendo ambienti di sviluppi specifici e di più facile e intuitivo utilizzo. Per quanto riguarda lo sviluppo di modelli BIM il software utilizzato per la realizzazione del modello 3D della cabina è Edificius nella sua versione MEP. La modellizzazione architettonica e impiantistica risulta intuitiva e di facile implementazione, per quanto laboriosa. In Figura 74 si riporta il risultato ottenuto, la trattazione di come è stato ottenuta esula dagli obiettivi di questo elaborato.

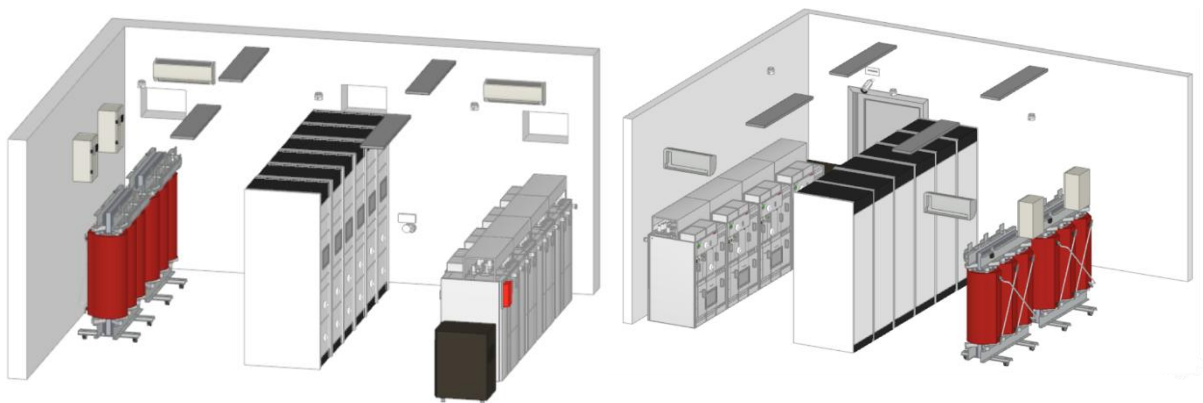


Figura 74 Modello BIM della cabine MT/BT

Una volta realizzato il modello 3D è stato caricato in formato IFC nella piattaforma usBIM.IoT, una piattaforma cloud-based messa a disposizione da ACCA Software per l'integrazione di modelli BIM e sistemi IoT, ossia per la realizzazione di Digital Twin. La piattaforma è pensata in realtà anche per gestire i progetti BIM durante tutto il loro ciclo di vita e mette a disposizione degli utenti uno spazio cloud per ospitare il progetto, accessibile da più utenti per consentire modifiche e lavorazioni simultanee in un unico ambiente, rispettando a pieno la filosofia di progettazione BIM. Nel caso in esame è stata utilizzata solo come repository per caricare il modello digitale in formato IFC.

Oltre al modello è necessario far confluire verso la piattaforma le informazioni dinamiche provenienti dal campo. Nonostante sia in grado di gestire nativamente diversi protocolli di comunicazione non esiste un supporto nativo per ModBus ed è stato quindi necessaria una conversione dei dati. In un server di campo è stato installato l'applicativo NodeRed, strumento open source per la gestione di flussi dati utilizzato anche nel sistema di monitoraggio distribuito descritto nel capitolo precedente. È un software di programmazione a blocchi basato su JavaScript che organizza il codice in flussi composti da più nodi, ognuno dei quali riceve un payload in input, lo elabora e lo inoltra al nodo successivo. È stato realizzato un flusso, replicato per ogni dato trasmesso, con le funzioni di: acquisizione dei dati in Modbus dai dispositivi di campo, elaborazione e traduzione verso il protocollo WebSocket e inoltro dei dati verso la piattaforma. I nodi che compongono il flusso sono i seguenti:

- Un nodo “timestamp” che rappresenta il trigger del flusso. È stato impostato per avviare la comunicazione ad intervalli regolari così da automatizzare il processo di comunicazione.
- Due nodi “selezione FC e registri” e “Modbus getter” gestiscono la comunicazione con i dispositivi in campo. Il primo definisce la modalità di comunicazione (lettura o

scrittura del registro), l'ID Modbus del dispositivo, il registro iniziale e la quantità di registri da leggere, il secondo, sulla base dei parametri ricevuti dal primo, instaura la comunicazione con il gateway IP tramite indirizzo IP e porta di comunicazione fornendo in output i dati letti.

- I due nodi successivi, “Buffer parser” e Notification Package” interpretano il dato e lo elaborano per inserirlo in una stringa in formato Json.
- Il nodo finale “WebSocket” si occupa di incapsulare il Json in un pacchetto WebSocket e di inviarlo alla piattaforma UsBim.IoT.

In *Figura 75* è riportato l'esempio di flusso per un multimetro del quadro di bassa tensione.

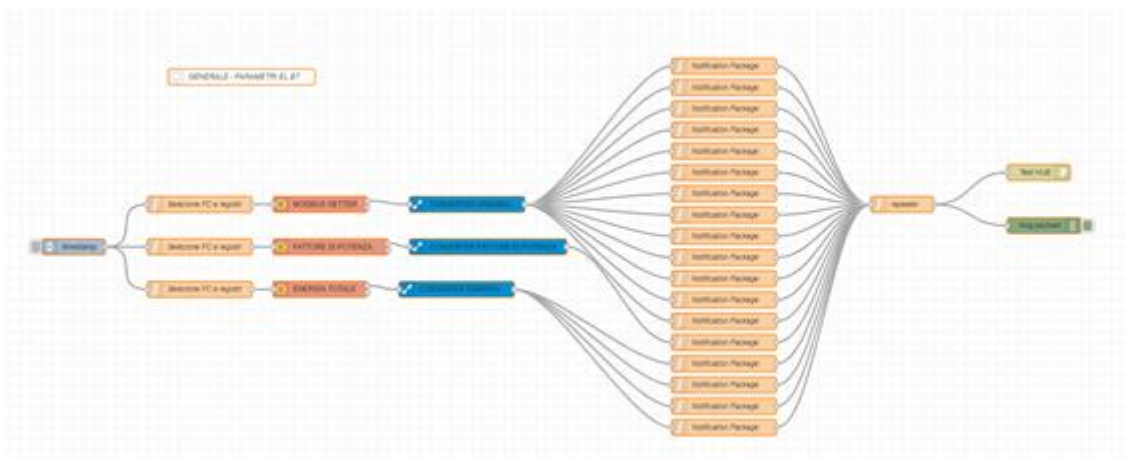


Figura 75 Flusso NodeRed per un multimetro Modbus

Una volta caricati sulla piattaforma modello IFC e dati dal campo questa può essere configurata per ottenere un'adeguata presentazione dei dati in interfaccia grafica. Tramite i tool di configurazione è possibile associare ogni dato all'elemento grafico a cui si riferisce e creare delle regole per gestire la colorazione dell'elemento in base al dato proveniente dal campo: è stata creata ad esempio una regola per mostrare gli interruttori con colorazione rossa o verde in base al loro stato di aperto o chiuso. Oltre alla rappresentazione cromatica dei dati sul modello 3D la piattaforma permette di affiancare al modello delle dashboard organizzate in viste e tiles. Sono state quindi create viste per ogni sezione della cabina: “QBT” per il quadro di bassa tensione, “QMT” per il quadro di media tensione, una per i trasformatori e una per i parametri ambientali, oltre alla vista generale di default che rappresenta l'intera cabina. Selezionando una vista la piattaforma centra la visualizzazione 3D sull'elemento interessato e mostra i dati ad esso associato nella dashboard organizzata in tiles. Si può accedere alle misure anche selezionando il componente dal modello 3D.

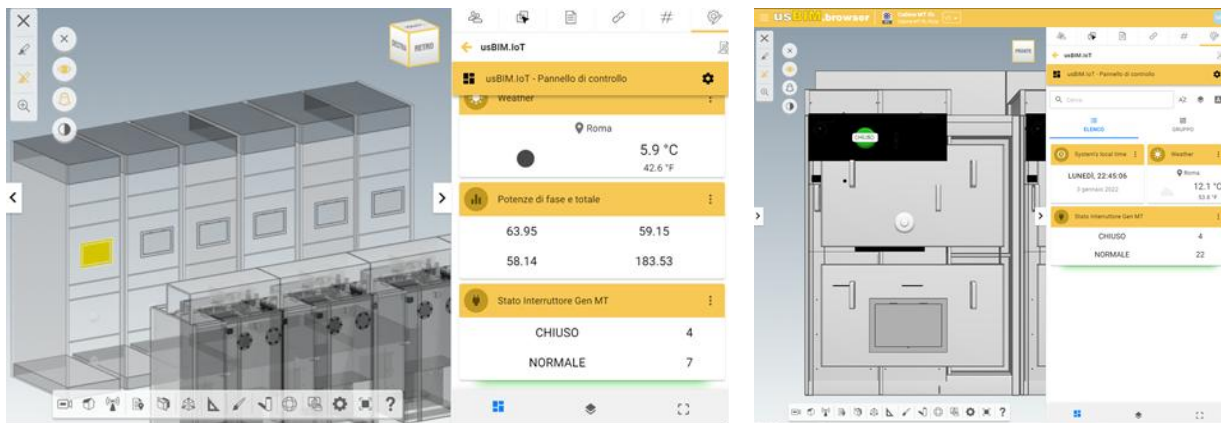


Figura 76 Digital twin in UsBIM IoT

AMBIENTE AUTODESK

Autodesk è la software house leader mondiale nella distribuzione di applicativi di supporto alla progettazione e al design industriale. Autocad, prodotto più noto della casa, è sinonimo di progettazione 2D, strumento diffusissimo per l'elaborazione di progetti e tavole in due dimensioni. Con il passaggio alla progettazione tridimensionale in ambiente BIM, Autodesk si è adeguata rilasciando il potente software Revit, probabilmente il più utilizzato al mondo. La realizzazione di modelli BIM in Revit è più complessa e meno intuitiva ma allo stesso tempo risulta più completa, versatile e graficamente più accattivante. Anche in questo caso non si descriveranno gli aspetti che hanno portato alla realizzazione del modello BIM ma solo il risultato finale.

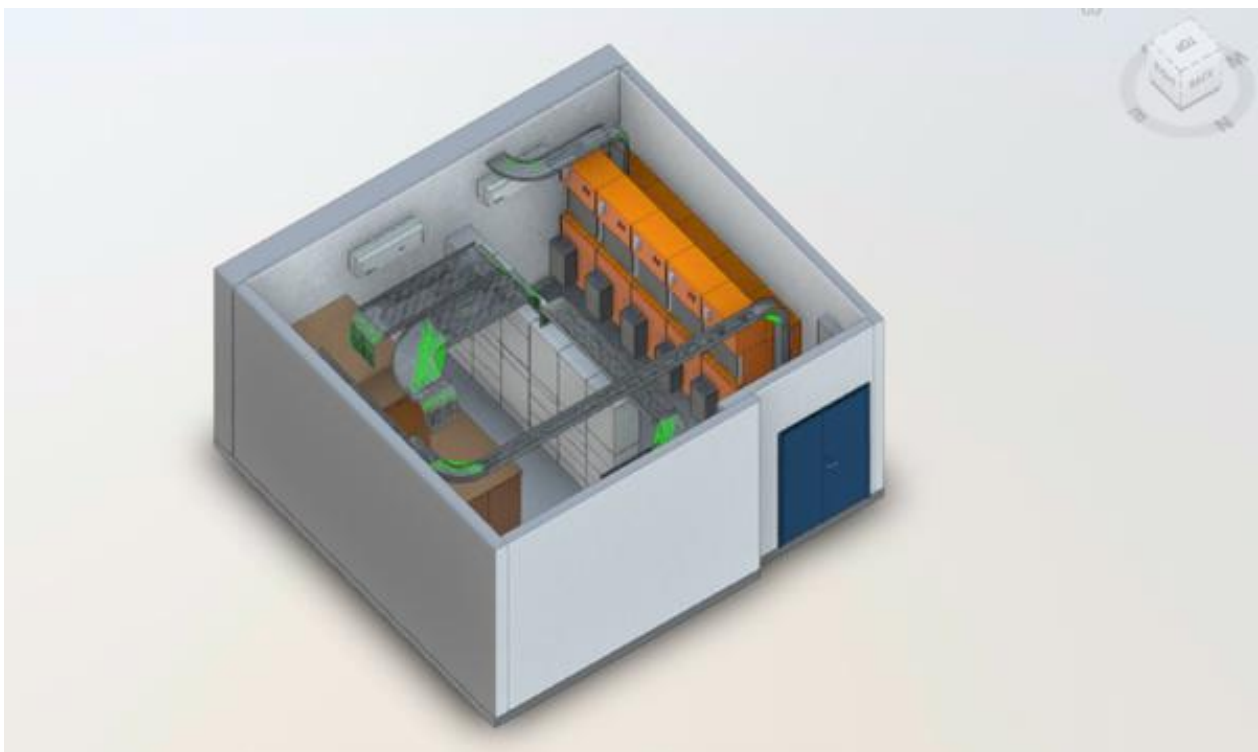


Figura 77 Risultato modellazione BIM Revit

Lo strumento software utilizzato per ospitare il Digital Twin in questo caso è stato Autodesk Forge (attualmente evoluto in Autodesk Platform services). L'integrazione del modello in Forge è più indiretta rispetto a quanto avvenuto con UsBIM in quanto ha previsto l'utilizzo del modulo Model Derivative API per la conversione del file.rvt (output di Revit) in un file SVF compatibile con Forge. Per quanto riguarda l'integrazione del sistema IoT, anche in questo caso non è stata possibile un'integrazione diretta in Modbus e lo stesso applicativo Nodered descritto in precedenza ha assunto il ruolo di gateway verso il protocollo WebSocket accettato da Forge, aggiungendo un blocco per le API [45].

I dati provenienti dal campo sono stati storicizzati in un database SQL e allo stesso tempo salvati in un file .json temporaneo contenente anche informazioni sull'ID del sensore, sulle coordinate geometriche associate al sensore e informazioni sul tipo di dato. Per collocare spazialmente il sensore all'interno del modello e associarlo ad un oggetto tridimensionale è stato utilizzato l'ambiente di configurazione fornito dal modulo Playground.

Tramite l'estensione Data Visualization è stato possibile invece creare delle regole per personalizzare la visualizzazione dei dati in tempo reale con semplici cambi di icone e di colorazione, e più complesse mappe di colore basate sull'interpolazione di dati provenienti da più sensori. Sul lato destro della schermata è stato possibile anche qui affiancare al modello una semplice dashboard riportante i dati numerici dei sensori associati agli oggetti selezionati.

La storicizzazione dei dati in un database ha consentito di aggiungere la funzione di slider temporale, potendo visualizzare sulla piattaforma stati passati del sistema.

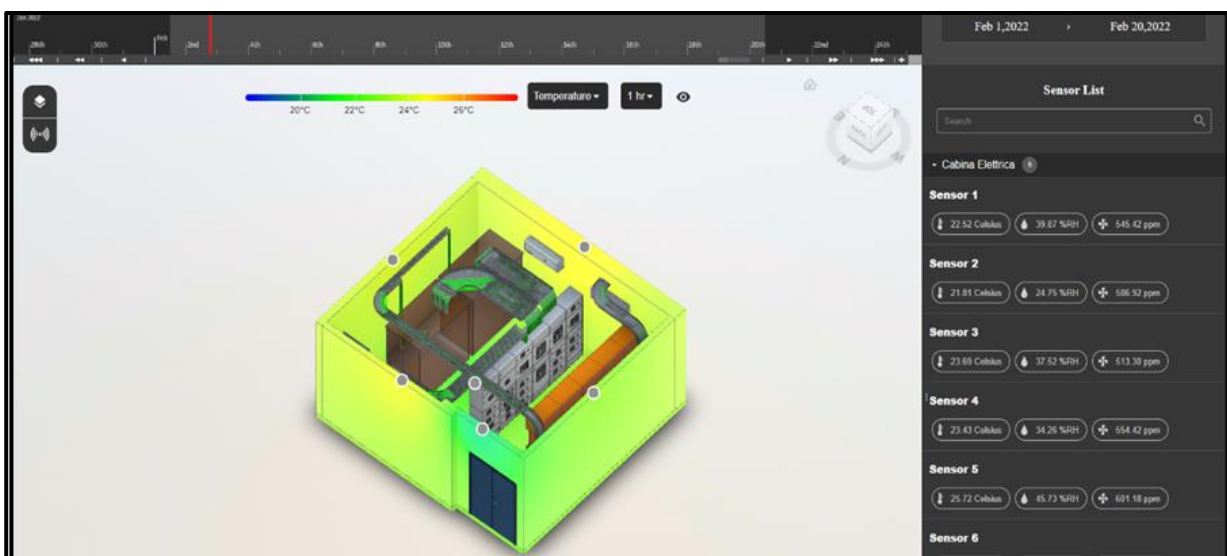


Figura 78 Digital Twin cabina MT/BT in ambiente Autodesk

3.3.2 Il Digital Twin del laboratorio LAMBDA

Il laboratorio Lambda, situato presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE) dell'Università "La Sapienza di Roma", come anticipato nel capitolo sui sistemi di monitoraggio, presenta una vasta dotazione di dispositivi IoT. Finora è stato descritto limitatamente al quadro e all'impianto elettrico, riportando l'architettura ModBus e IP del sistema di monitoraggio ma questa non è la sola dotazione presente. Sfruttando la rete IP, al monitoraggio in Modbus è stata affiancata una seconda rete BACS (Building Automation Control System) basata sul protocollo KNX alla quale sono affidate le seguenti funzioni:

- monitoraggio dei parametri ambientali interni quali temperatura, umidità luminosità e movimento, grazie a due dispositivi multisensore posti all'altezza dell'impianto di illuminazione in posizioni tali da coprire l'intera superficie calpestabile del laboratorio;
- monitoraggio dei parametri ambientali esterni quali temperatura, umidità, luminosità, velocità del vento e pioggia, grazie ad una stazione meteorologica posta sul tetto del dipartimento;
- controllo carichi su 8 prese dotate di spia di segnalazione presenza tensione, tramite un attuatore a 8 canali posto all'interno del quadro elettrico
- controllo della climatizzazione grazie ad un'interfaccia KNX in grado di controllare l'unità interna del condizionatore
- controllo del sistema di illuminazione, composto da 8 strip led dimmerabili comandate da altrettanti alimentatori DALI riportati sotto l'architettura KNX tramite un gateway posto nel quadro elettrico.



Figura 79 Multisensore

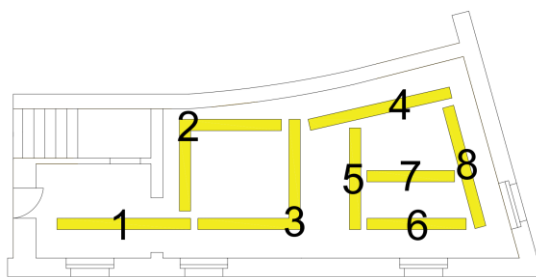


Figura 80 Layout illuminazione laboratorio LAMBDA

A completare l'architettura, il server già descritto nel capitolo dedicato al monitoraggio del laboratorio è collegato all'infrastruttura IP del laboratorio, ospitando al suo interno il software Home Assistant che come anticipato, non assume solo in ruolo di EMS (Energy Monitoring System) ma anche quello di supervisore e piccolo BMS (Building Management system). L'architettura del sistema è mostrata in [Figura 81](#).

Il monitoraggio dei parametri ambientali interni consente una gestione automatizzata degli impianti di illuminazione e di climatizzazione. La presenza di un sistema KNX e di un

supervisore avanzato mette a disposizione due possibilità di gestione dei sistemi: la programmazione in ETS dei dispositivi KNX, sfruttando quindi l'intelligenza distribuita tipica di questo sistema, o il controllo centralizzato programmando le logiche direttamente nel supervisore [47].

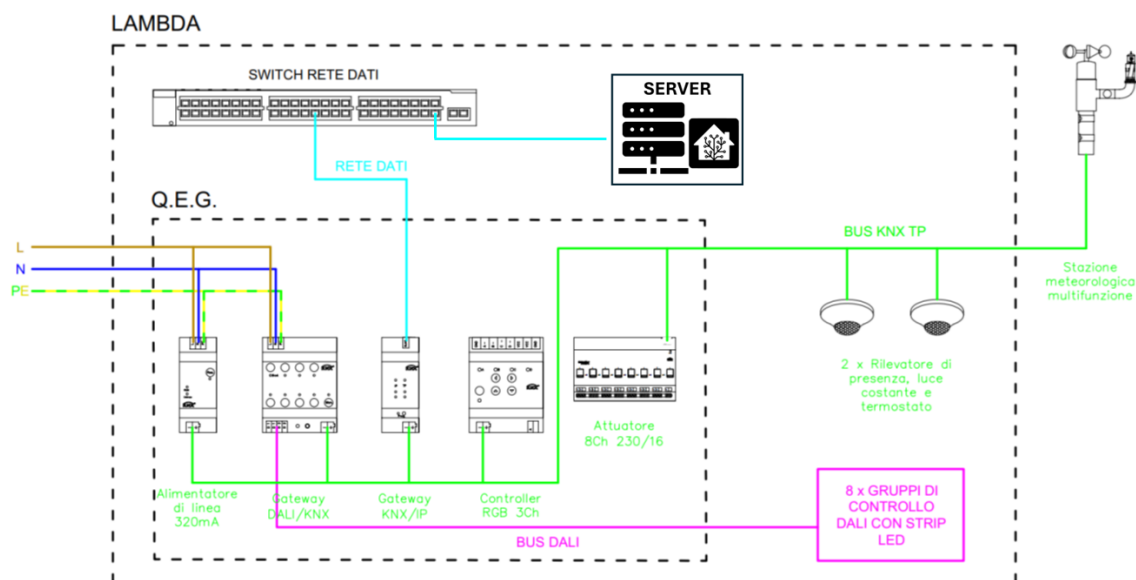


Figura 81 Architettura del sistema BACS

Per quanto riguarda l'illuminazione è stato applicato un controllo basato sia sul rilevamento dei movimenti sia sui livelli di luminosità, gestendo le strip led on/off e in dimming. Il laboratorio è stato diviso virtualmente in due spazi: "entrance", sottesa alle strip led 1,2,e 3, "workspace", interessata invece dalle strip led 4, 5, 6, 7, e 8. La suddivisione è stata effettuata sulla base della copertura dei due sensori di movimento PIR presenti. La logica applicata per l'accensione e lo spegnimento è quella classica: le strip led vengono accese non appena viene rilevato un movimento e vengono spente quando il sistema non rileva movimenti per più di 5 minuti. Per questo controllo si è optato per l'implementazione delle logiche direttamente in ETS. Il controllo della luminosità è stato invece affidato ad un automazione di Home Assistant, sfruttando tutte le potenzialità di gestione agevole e flessibile che l'applicativo mette a disposizione (con ETS risulterebbe più complesso e laborioso). L'automazione ha come obiettivo quello di mantenere un livello di illuminamento costante all'interno dell'ambiente impostabile tramite interfaccia grafica su un target definito e regolando in percentuale la potenza luminosa delle strip led, compensando così l'apporto gratuito di luce solare e riducendo i consumi legati all'illuminazione. L'automazione si attiva quando le luci risultano accese (le automazioni in Home Assistant sono a tutti gli effetti delle entità e posso essere attivate e disattivate chiamando i servizi "automation.turn_on" e "automation.turn_off") e viene eseguita ogni due secondi impostando un trigger temporale;

viene quindi confrontato il valore di luminosità con il valore target impostato in precedenza e se lo supera del 5% viene ridotta la luminosità progressivamente a step dell'1%, se invece è inferiore del 95% del valore target la luminosità viene aumentata. Impostare una banda morta del 5% sia in eccesso che in difetto consente di evitare pendolamenti eccessivi nella regolazione.

Per quanto riguarda la gestione della climatizzazione è stato sufficiente integrare correttamente il condizionatore trasformandolo in un'entità del tipo "climate". Quest'entità è pensata per gestire questo tipo di apparecchi e mette a disposizione come stati la modalità di funzionamento dell'apparecchio (off, cool, dry, heat, fan) e come attributi la temperatura target, facilmente impostabile tramite interfaccia grafica, e la temperatura ambiente, potendola legare alla temperatura rilevata da un sensore esterno. Configurata correttamente l'entità la regolazione della temperatura avviene in automatico ed è bastato aggiungere un'automazione per comandare lo spegnimento del dispositivo sulla base degli orari di esercizio del dipartimento, seguendo la logica di regolazione "manual-ON/auto-OFF".

Anche per il laboratorio è stato realizzato un digital twin in due versioni: una in ambiente ACCA Software utilizzando un file .ifc come modello 3D e una direttamente in Home Assistant realizzando il modello 3D in ambiente non BIM, ottenendo come output un file .obj.

DIGITAL TWIN IN AMBIENTE ACCA SOFTWARE

Per quanto riguarda il digital twin in ambiente ACCA Software è stata seguita la stessa procedura descritta nel paragrafo precedente per la cabina MT/BT, con l'aggiunta di ulteriori flussi NodeRed per gestire integrare e gestire i componenti KNX all'interno della piattaforma UsBIM.IoT. L'utilizzo del protocollo KNX come origine dei dati semplifica notevolmente la struttura dei flussi NodeRed; in primo luogo, non è necessario un nodo di trigger (nodo TimeStamp nel flusso basato su ModBus) in quanto i sistemi KNX non presentano una gerarchia master/slave e i dispositivi di campo inoltrano le informazioni autonomamente senza la necessità di essere interrogati a intervalli regolari dal master. La seconda semplificazione riguarda i nodi di acquisizione dati: è stato necessario inserire solamente il nodo "KNX Device" specificando al suo interno IP del gateway, indirizzo di gruppo dove l'informazione richiesta viene inoltrata e Datapoint (tipo di dato acquisito). Una volta acquisito il dato viene trasferito al nodo "Notification Package" per la traduzione nel protocollo WebSocket e infine inviato alla piattaforma tramite il nodo "WebSocket out".

In **Figura 82** è mostrato un esempio di flusso per l'acquisizione dei dati in KNX, evidentemente più snella e semplice.

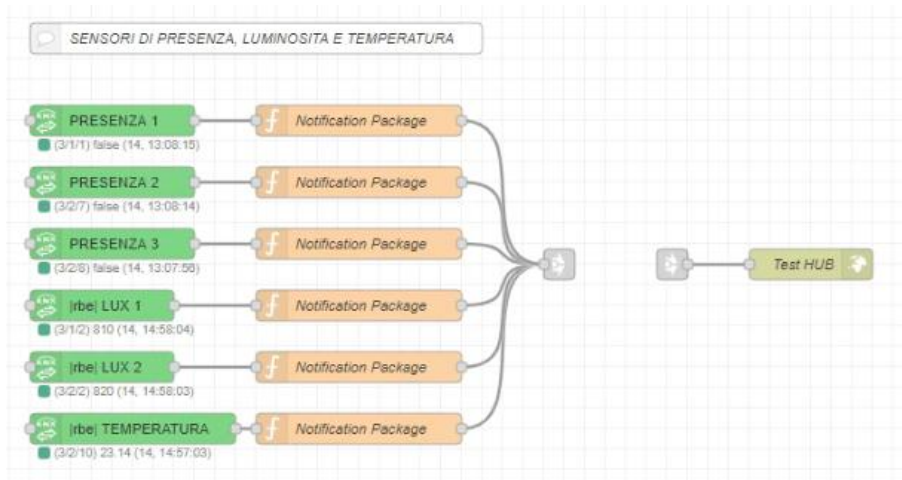


Figura 82 Flusso NodeRed sensore KNX

Avendo a disposizione in questo caso anche dispositivi controllabili, in questo caso è stato possibile realizzare la comunicazione nella direzione opposta, dalla piattaforma al campo, mettendo a disposizione di UsBIM.IoT la funzionalità di controllo oltre che di monitoraggio.

È stato necessario dunque realizzare un'altra tipologia di flusso NodeRed, sfruttando in ingresso il nodo "WebSocket in", che inoltra il comando ricevuto dalla piattaforma in una stringa in formato Json. La stringa viene quindi letta dall'omonimo nodo e gestita tramite i nodi "Switch", il comando viene formattato coerentemente con il protocollo KNX e tramite il nodo "KNX Device" viene scritto sul bus. Un flusso in direzione inversa abilita infine un messaggio di feedback attivo, comunicando alla piattaforma che il comando è stato eseguito con successo e aggiornando lo stato dell'oggetto controllato [46].

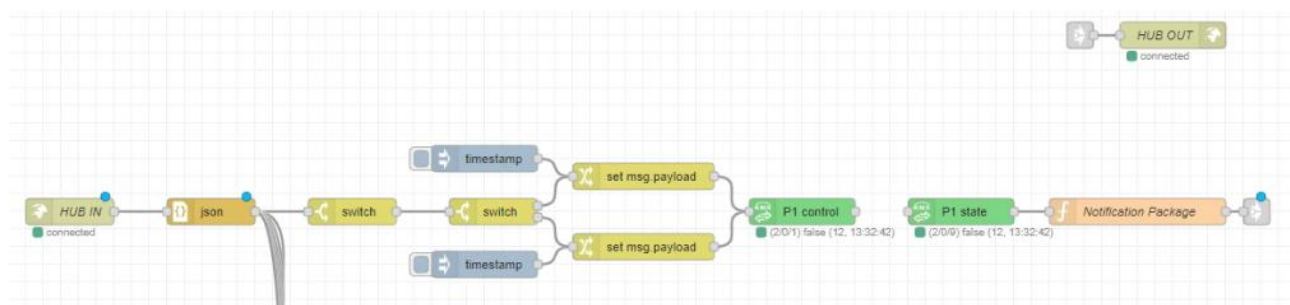


Figura 83 Flusso NodeRed di comando

Nella figura a seguire sono mostrati i risultati ottenuti con esempi sulla gestione dell'illuminazione (in alto), monitoraggio del quadro (in basso a sinistra) e il controllo delle prese comandabili (in basso a destra).

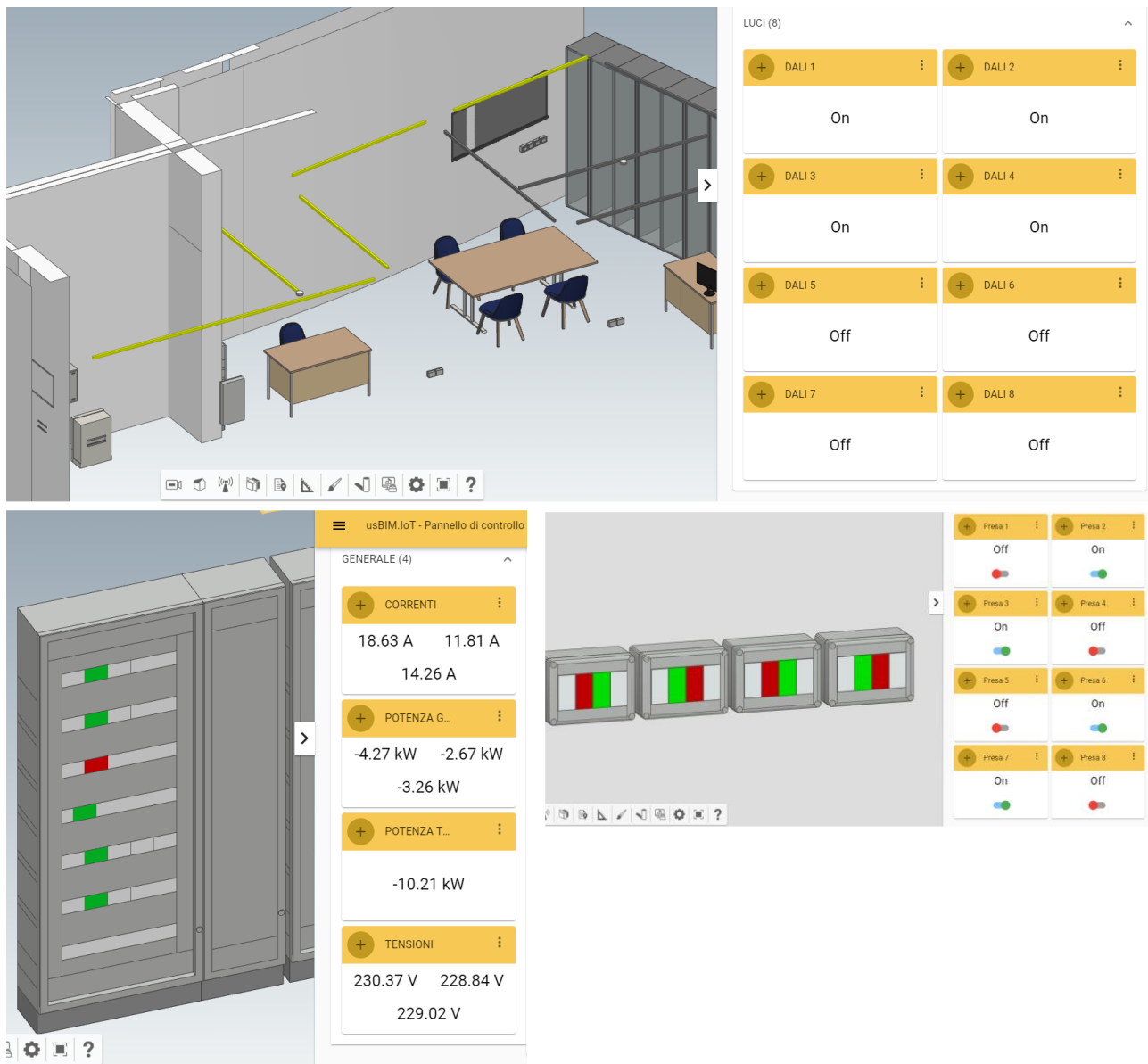


Figura 84 Digital Twin del laboratorio LAMBDA in USBIM.IoT

DIGITAL TWIN IN AMBIENTE HOME ASSISTANT

La seconda versione del digital twin ha seguito una procedura più semplificata e ha portato di conseguenza a risultati più riduttivi. L'obiettivo di questa prova è stato quello di capire se fosse possibile applicare questa tecnologia a contesti meno esigenti come quello residenziale, riducendo di conseguenza lo sforzo in termini di competenze, costi e ore di lavoro. Come punto di partenza è stato creato il modello 3D del laboratorio su un software di modellazione 3D molto semplice e intuitivo: SweetHome3D. Il software permette di creare rapidamente muri e stanze in una vista in pianta e di aggiungere luci e arredamento da un menù di selezione, espandibile tramite librerie o importando direttamente il file .obj

dell'oggetto desiderato. In una finestra in basso è infine possibile visualizzare in una vista 3D le modifiche effettuate al modello.

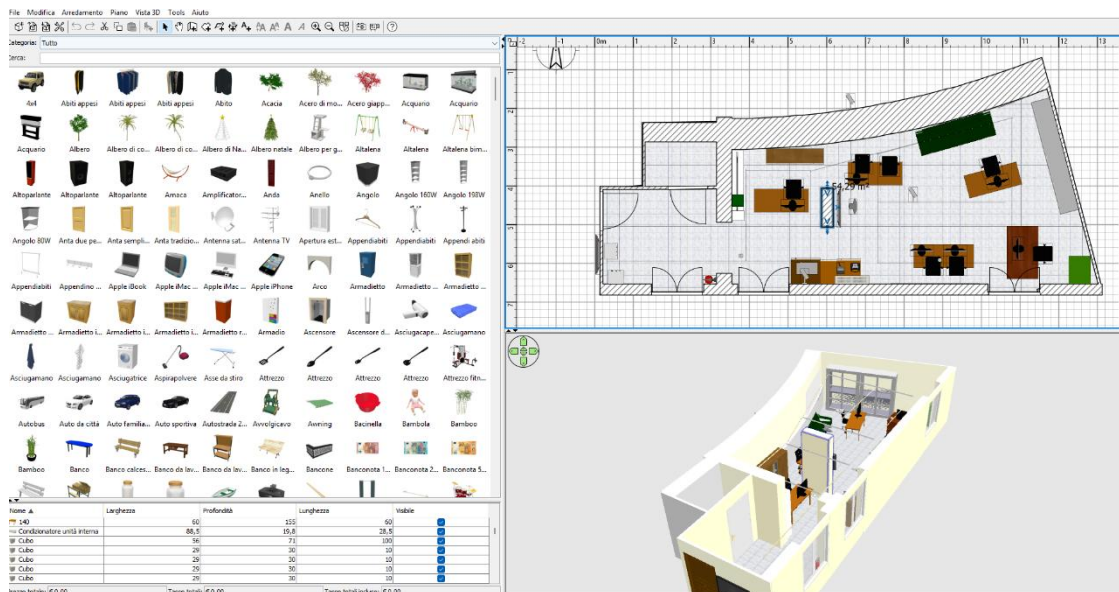


Figura 85 Schermata SweetHome 3D

Completato il modello viene esportato ottenendo due file: un file .obj contenente informazioni sulla geometria dei vari oggetti e sul loro posizionamento, un file .mtl (Material Template Library), richiamato a sua volta nel file obj per specificare le caratteristiche visive degli oggetti quali colore, texture, ombre, riflessi, opacità ecc.

Lato Home Assistant è necessario installare un componente in grado di gestire questi file. La soluzione utilizzata è stata l'integrazione per front-end "Floor-3D". Questa integrazione permette di inserire nelle dashboard di Home Assistant l'omonima custom card dove è possibile visualizzare il modello 3D con navigazione completa (rotazione del modello, zoom, e spostamento) e collegare ai singoli oggetti che lo compongono le entità di riferimento al fine di variare la vista nel modello in base al loro stato e poterci interagire cliccando direttamente sul modello. La configurazione della card può avvenire tramite interfaccia grafica o in .yaml e prevede l'inserimento dei seguenti parametri principali:

- path: dove indicare il percorso della cartella del server dove risiede il file
- objfile: nome del file .obj del modello
- mtlfile: nome del file .mtl legato al modello
- entities: lista delle entità collegate al modello. Per ogni entità va definito anche il tipo (luce, sensore, climate, ecc) l'object_id dell'oggetto al quale l'entità è associato e nel caso delle luci i lumen da renderizzare alla sua accensione.

È inoltre possibile raggruppare più oggetti e legare all'entità direttamente il gruppo.

Il risultato ottenuto risulta graficamente molto performante nonostante la rapidità e la facilità nella creazione del modello e nella configurazione della card; tuttavia, presenta delle limitazioni forti che rendono questo metodo in primis non adattabile a situazioni più complesse di un semplice impianto domotico: il modello riesce a gestire graficamente pochi elementi. Solo l'illuminazione e i serramenti visualizzano effettivamente un riscontro oggettivo sul modello aumentando l'illuminazione della stanza a luci accese e aprendo la porta quando il contatto magnetico segnala l'apertura. Per le restanti entità ben poco si può fare, in particolare nella gestione di informazioni leggermente più complesse come un banale stato numerico. Anche dal punto di vista del controllo, solo cliccando sulle luci si ha la possibilità di modificare direttamente il loro stato, mentre per le altre tipologie di entità il click riporta al pop-up "more-info" dell'entità per la gestione. Nelle figure a seguire si riportano due scenari del laboratorio mostrati sulla card: il primo con luci spente e porta chiusa, il secondo con luci accese e porta aperta.

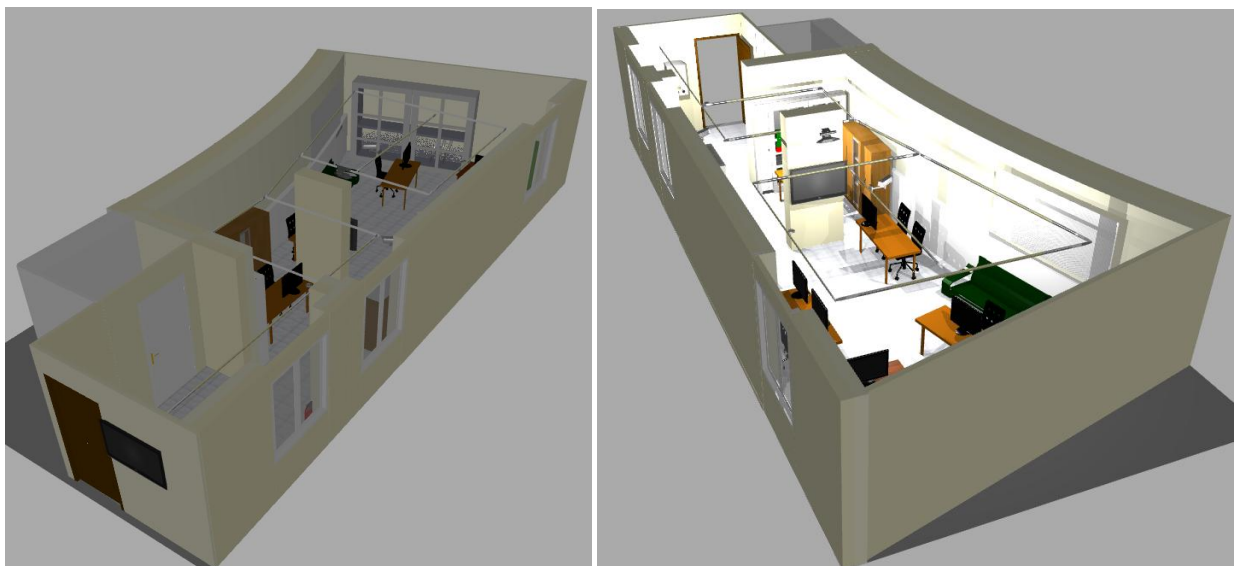


Figura 86 Digital Twin del laboratorio LAMBDA in ambiente Home Assistant

In realtà anche per applicazioni domotiche, a parere di chi scrive, non rappresenta uno strumento particolarmente utile in quanto l'elaborazione grafica viene demandata completamente al dispositivo che sta visualizzando il modello (solitamente quindi uno smartphone), risultando in rallentamenti eccessivi soprattutto nella fase di caricamento del modello. Per finalità di domotica risulta molto più efficace una semplice mappa 2D generata con scheda "picture-element" dove poter inserire come elementi tutte le entità che si vuole monitorare e controllare, come mostrato in *Figura 87*, sempre applicato al laboratorio LAMBDA.

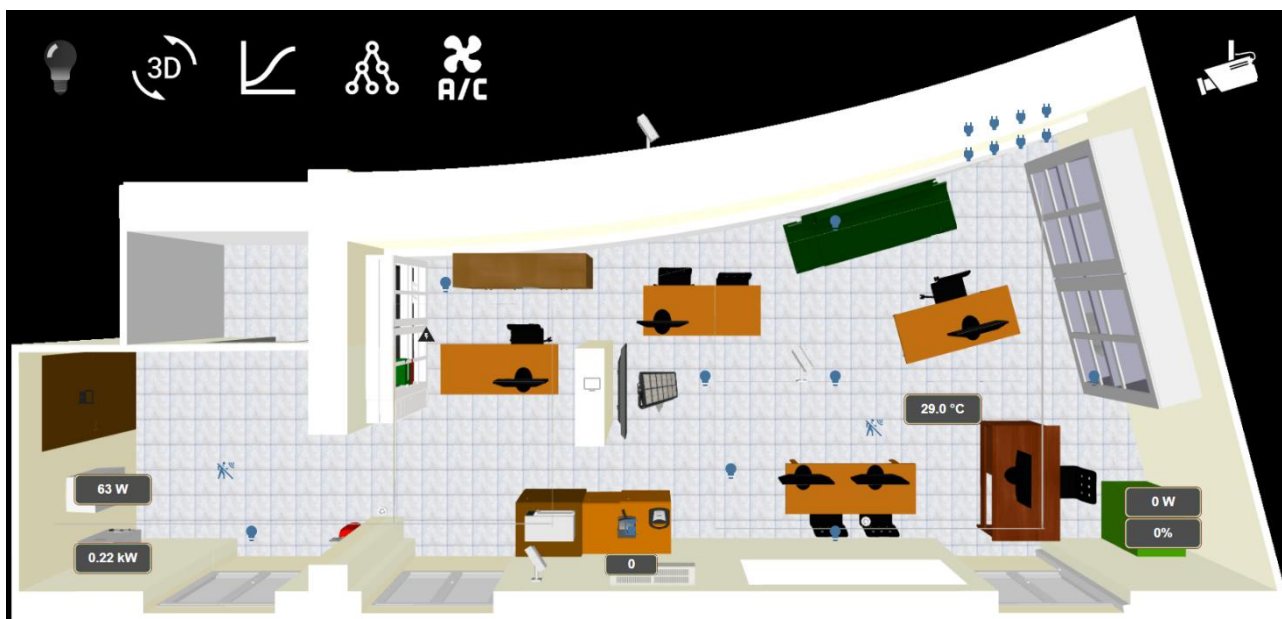


Figura 87 Dashboard 2D del laboratorio LAMBDA

3.3.3 Analisi comparativa delle tecnologie testate

L'impegno nello sviluppo pratico di modelli di digital twin utilizzando tecnologie differenti e soluzioni di varie software house consente di confrontarle in termini di qualità dei prodotti finali e di semplicità di implementazione. Le soluzioni proposte dalle suite software prese in considerazione permettono di raggiungere livelli elevati dal punto di vista prestazionale, portando allo sviluppo di prodotti completi in grado di integrare e gestire tutti i sistemi tecnici e speciali coinvolti. Sebbene sia stato necessario introdurre attori terzi nel ruolo di middleware per la comunicazione con i sistemi basati su KNX e Modbus, questo può essere considerato un aspetto facilmente superabile con aggiornamenti e sviluppi futuri. Per quanto riguarda le procedure di implementazione, in entrambi i casi si sono rivelate laboriose e onerose dal punto di vista delle risorse temporali impiegate, ma va considerato che in gran parte sono state dedicate all'elaborazione del modello BIM. Le due soluzioni indagate possono considerarsi al momento equiparabili: per quanto ACCA software risulti più intuitiva e di facile interpretazione, i risultati ottenuti con la suite Autodesk presentano una riuscita grafica leggermente più realistica e dettagliata. La soluzione open source, basata su modelli differenti rispetto al BIM, invece si colloca su un piano completamente differente e raggiunge livelli prestazionali non comparabili. Il supporto efficace al solo sistema di illuminazione palesa quanto tale soluzione sia inadeguata a contesti diversi rispetto a quello residenziale (effettivamente nasce per quel tipo di sistemi), presentando comunque dei limiti anche per tali applicazioni. L'utilizzo di modelli 3D più semplici è tuttavia un punto di forza da non sottovalutare in quanto in alcune situazioni sono richiesti digital twin con finalità principale

di interfaccia grafica avanzata e localizzazione spaziale delle differenti entità, rendendo superflui gli aspetti informativi, che arricchiscono notevolmente i modelli BIM rispetto ad una mera riproduzione geometrica, in particolare in riferimento al carico di lavoro che comportano. Un ultimo aspetto da prendere in considerazione, forse non evidenziato abbastanza in precedenza, è legato all'architettura informatica dei diversi sistemi: la soluzione open source è l'unica a poter essere sviluppata in ambiente completamente locale, mentre le altre si appoggiano sempre su servizi cloud. In linea di massima, non è un aspetto altamente penalizzante, ma negli ultimi anni l'attenzione alla privacy, alla sicurezza informatica e al tema dei big data sta portando molte realtà a preferire, e in alcuni casi a pretendere, sistemi on-premise sui quali avere pieno controllo, accessibili e funzionanti anche in caso di malfunzionamenti delle infrastrutture digitali e soprattutto mantenendo una proprietà fisica dei dati collegati a sistemi tecnici talvolta sensibili. Queste valutazioni hanno portato allo sviluppo di una soluzione sperimentale che possa soddisfare le esigenze sopracitate, analizzata nel capitolo a seguire riguardo gli sviluppi sperimentali sul Digital Twin.

4. SVILUPPI SPERIMENTALI

4.1 Sistemi di monitoraggio

4.1.1 Monitoraggio distribuito: una piattaforma sperimentale

Per monitoraggio energetico si intende nella maggior parte dei casi il monitoraggio più o meno capillare dei consumi legati ad un edificio o un complesso di edifici adiacenti, appartenenti allo stesso nucleo. La recente introduzione di incentivi e, più in generale, la promulgazione normativa riguardo le comunità energetiche ha elevato l'interesse anche verso il monitoraggio energetico diffuso: vengono monitorati i consumi di diversi edifici con ubicazione non localizzata e confinata a porzioni di territorio limitate. Uno studio adeguato alla realizzazione di comunità energetiche efficienti e vantaggiose richiede spesso una base adeguata di dati e profili di consumo al fine di sviluppare algoritmi di simulazione basati su dati reali. Una grande mole di dati consente inoltre l'utilizzo di algoritmi di ottimizzazione basati su reti neurali e deep learning. In molti casi risulta estremamente difficile reperire dataset adeguati.

Da queste esigenze nasce il progetto che ha portato alla realizzazione della piattaforma descritta in questo capitolo. Il progetto ha come finalità la raccolta e la condivisione di profili di consumo residenziali eterogenei per tipologia di abitazione, di occupanti e per ubicazione [49].

Campagna di monitoraggio

Il punto di partenza è stata una campagna di monitoraggio permanente presso varie utenze su base chiaramente volontaria. Tramite differenti canali è stato contattato un pool variegato di utenti, i quali sono stati invitati a compilare un form online necessario per classificare sotto vari aspetti la tipologia di consumatore:

- la prima sezione del form riguarda i dati anagrafici e l'ubicazione dell'utenza (*Figura 88*), i primi utile banalmente per un'eventuale necessita di contatto futuro, la seconda finalizzata alla localizzazione dell'utenza.

Modulo di Autorizzazione e Monitoraggio consumi elettrici unità abitativa

Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica - Sapienza Università di Roma

[Accedi a Google per salvare i risultati raggiunti. Scopri di più](#)

* Indica una domanda obbligatoria

Informazioni anagrafiche

Nome *

La tua risposta

Cognome *

La tua risposta

Denominazione indirizzo (via, viale, piazza, ecc...) *

Scegli

Indirizzo *

La tua risposta

numero civico *

La tua risposta

CAP *

La tua risposta

Città *

La tua risposta

Provincia *

La tua risposta

E-mail *

La tua risposta

Figura 88 Modulo informazioni anagrafiche e ubicazione campagna monitoraggio

- La seconda sezione richiede l'inserimento di informazioni sulla tipologia di abitazione in oggetto (appartamento, appartamento indipendente/Villa monofamiliare, unità in villa multifamiliare, studio/ufficio, altro) la metratura, il numero di occupanti e la loro tipologia (minori in età prescolare, studenti, lavoratori smart, ibridi e in presenza, casalinghi pensionati o disoccupati) (*Figura 89*). Si è cercato di includere tutte le informazioni che possano in qualche modo influenzare i consumi di energia in valore assoluto e nella loro distribuzione temporale nell'arco della giornata.

Dati abitazione	Tipologia residenti
Tipologia abitazione * ☐ Appartamento in edificio condominiale ☐ Appartamento indipendente/Villa monofamiliare ☐ Unità in villa multifamiliare ☐ Studio/Ufficio ☐ Altro	Numero persone nell'abitazione * Il numero di persone inserite in questa risposta deve coincidere con la somma delle prossime risposte. Scegli ▼
Superficie abitazione (metri quadri) * La tua risposta _____	di cui lavoratori NON in smart * ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4+

Figura 89 Sezione Dati abitazione modulo campagna

- La sezione successiva è dedicata all'impianto elettrico, con domande su potenza e tariffa contrattuale (utile anche ai fini di servizi messi a disposizione dell'utente che aderisce alla campagna, spiegati in seguito) e sulla presenza o meno di impianto fotovoltaico.
- Un'ulteriore sezione è dedicata all'impianto HVAC, chiedendo di specificare la tipologia e una quantificazione qualitativa del suo utilizzo (Figura 90). È possibile comunicare se l'impianto di riscaldamento è basato su caldaia a gas o pompa di calore, se centralizzato o autonomo, se l'acqua calda sanitaria è generata tramite caldaia o boiler elettrico, e se il raffrescamento sia centralizzato, autonomo o assente.

Tipologia impianti termici	Condizionatori *
Riscaldamento (termosifoni, impianto a pavimento, ecc...) * ☐ Centralizzato (qualsiasi) ☐ Caldaia autonoma (caldaia a gas, caldaia a biomassa, termocamino, stufa a pellet, ecc.) ☐ Pompa di calore autonoma ☐ Ibrido autonomo (pompa di calore + caldaia)	Condizionatori * ☐ Sì ☐ No
Quanto utilizzi l'impianto di riscaldamento durante l'inverno? * ☐ Poco ☐ Medio ☐ Tanto	Quanto utilizzi i condizionatori durante l'estate? * ☐ Mai ☐ Poco ☐ Medio ☐ Tanto
Acqua calda sanitaria * ☐ Associata al riscaldamento ☐ Centralizzato (qualsiasi) ☐ Caldaia ☐ Boiler elettrico/Scaldabagno ☐ Pompa di calore autonoma	Quanto utilizzi i condizionatori durante l'inverno? * ☐ Mai ☐ Poco ☐ Medio ☐ Tanto

Figura 90 Sezione impianti modulo campagna monitoraggio

- Infine, è possibile specificare i principali carichi elettrici presenti presso l'utenza selezionabili da un elenco predefinito (tra cui frigorifero, forno elettrico, lavatrice, asciugatrice, piastre a induzione, colonnine di ricarica, ecc), scegliere username e password per l'accesso alla piattaforma e acconsentire al trattamento dei dati ai sensi della normativa vigente.

Una volta compilato il form e fornito il consenso al trattamento dati si può procedere con l'installazione dei dispositivi di monitoraggio. A tal fine sono stati selezionati i dispositivi Shelly EM per circuiti monofase (due canali di misura) e Shelly 3EM per quelli trifase. La scelta è stata guidata da: fattore economico, in quanto sono dispositivi disponibili a cifre modeste, elevata conoscenza del prodotto e flessibilità nella comunicazione, potendo scegliere una comunicazione tramite cloud Shelly (che offre comodi API per l'esportazione dei dati) e tramite protocolli http, CoLoT e MQTT, mentre a livello di connettività è possibile sfruttare una connessione WiFi.

La misura avviene tramite collegamento in parallelo per la rilevazione dei livelli di tensione, mentre un trasformatore amperometrico a toroide apribile consente la rilevazione non invasiva della corrente. Nelle figure a seguire è rappresentato lo schema di collegamento dei due dispositivi e delle installazioni realizzate.

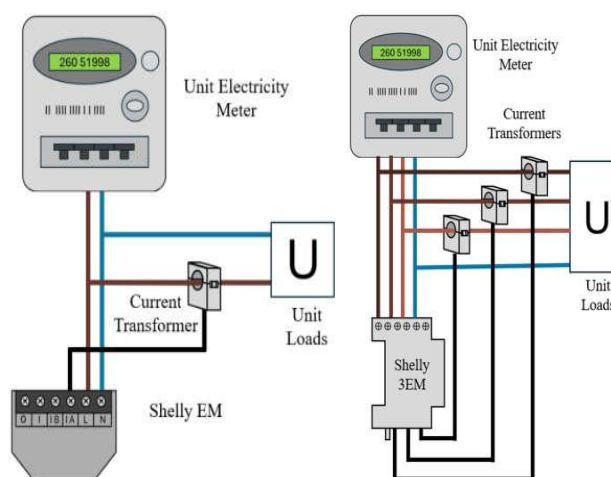


Figura 91 installazione reale a sinistra e schema di collegamento a destra

All'atto dell'installazione viene compilato un secondo form contenente le informazioni relative all'utenza e a: id del dispositivo, canale, e account cloud dove risiede il dato, al fine di poter associare automaticamente i dati prelevati all'utenza corretta.

Architettura del sistema

Seguendo il percorso dei dati, una volta prelevati dai misuratori vengono inviati tramite protocollo crittografato https al cloud della Shelly sfruttando la connessione internet

dell'utente o una connessione abilitata ad hoc (nel caso ad esempio di più utenti nello stesso condominio, con misuratori installati nel locale contatori, è stato necessario utilizzare un router dotato di connessione 4G tramite SIM mobile). Tramite API il server dove la piattaforma è ospitata contatta il cloud Shelly e preleva i dati dei singoli utenti. Sfruttando ancora il protocollo https, i dati vengono messi a disposizione dell'utenti tramite dashboard intuitive realizzate con l'applicativo Home Assistant (ogni utente può accedere tramite username e password al sistema e visualizzare i propri dati) e a disposizione per il download anonimo per enti ricerca sulla pagina web della piattaforma.

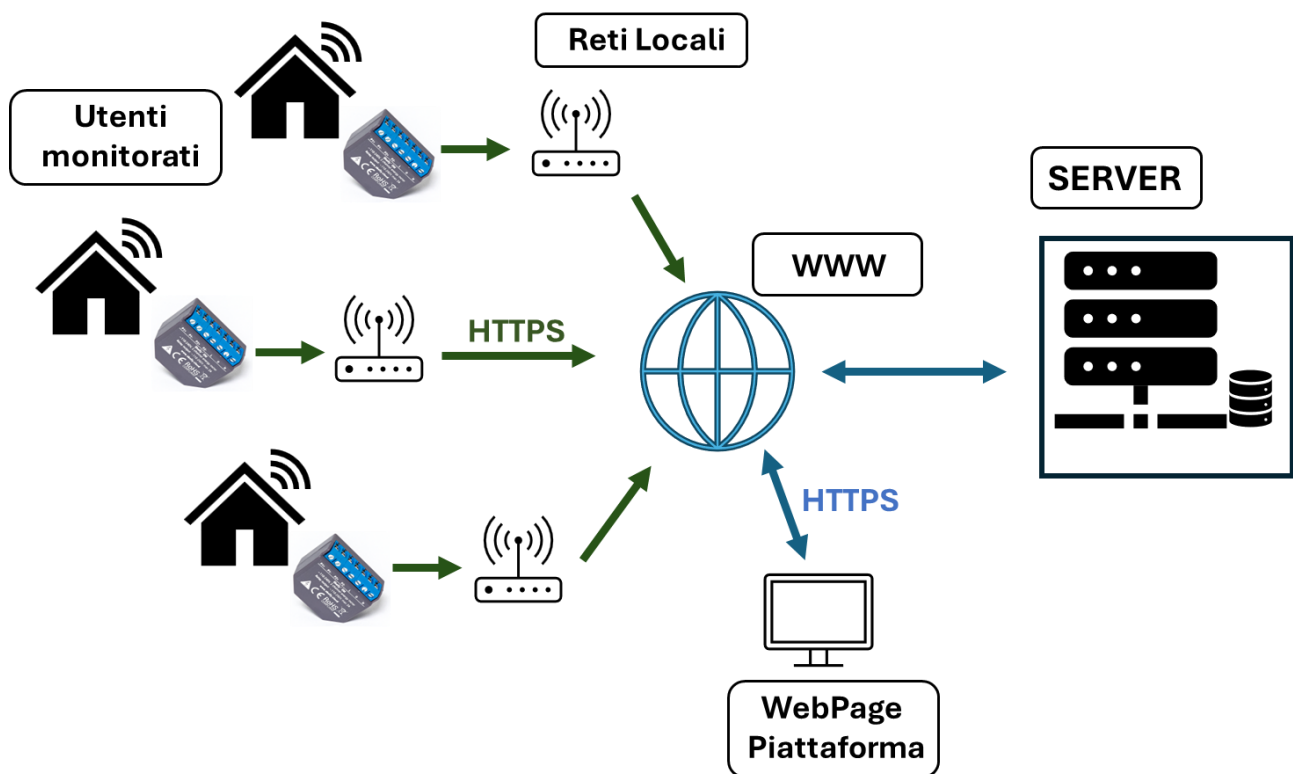


Figura 92 Architettura del monitoraggio distribuito

La piattaforma

La piattaforma si compone di più moduli, ognuno dedicato a una specifica funzione, interconnessi tra loro e installati all'interno di altrettanti container docker in un server Linux.

Gli elementi centrali della piattaforma sono il sistema di database e Home Assistant, utilizzato per la gestione delle interfacce grafiche e della storicizzazione dei profili di consumo, mentre a loro servizio sono presenti un modulo di gestione dei csv provenienti dai

form, un modulo per la configurazione delle dashboard e la comunicazione con il cloud Shelly e un modulo per la gestione della pagina Web della piattaforma e il download dei dati.

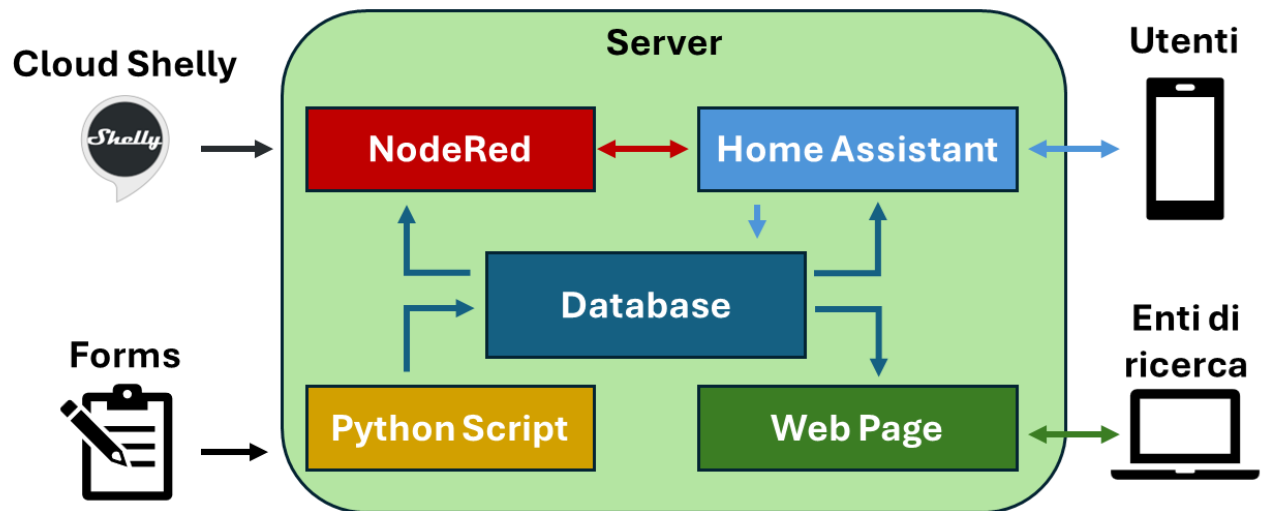


Figura 93 Composizione logica della piattaforma

- **Sistema di database:** al fine di gestire i dati garantendo sicurezza e rispetto della privacy non è stato creato un database unico, ma più database, organizzati in più tabelle, connessi tra loro tramite degli ID anonimi. Il Database 1, realizzato in MySQL, è quello più delicato; accoglie i dati provenienti dai form, inclusi quindi anche quelli più sensibili come ubicazione dell'utenza, nome e cognome dell'utente e informazioni sugli inquilini delle unità residenziali. Questo database non viene mai esposto verso l'esterno per ovvi motivi ed è stato frammentato in più tabelle in modo tale che anche se si riuscisse ad accedere ad una di queste le informazioni a disposizione resterebbero anonime. Il database 3 è invece realizzato in SQLite ed è quello associato ad Home Assistant. Contiene gli storici dei profili di consumo di tutti gli utenti anonimizzati tramite l'utilizzo di user ID e risulta esposto sul web tramite Home Assistant stesso, previa quindi autenticazione con username e password e pubblicato utilizzando il servizio Cloudflare, che garantisce livelli di protezione contro attacchi informatici base (Brute Force, scraping e DDos). Il database 2, anch'esso realizzato in MySQL, è dedicato alla pagina web della piattaforma. Replica il database 3 pubblicando i profili di consumi in forma anonima e legandoli alle informazioni anonimizzate del database 1. Vengono esposte infatti solo le informazioni utili a caratterizzare energeticamente un'utenza e la localizzazione viene fornita solo per area geografica (nord, sud e centro Italia).

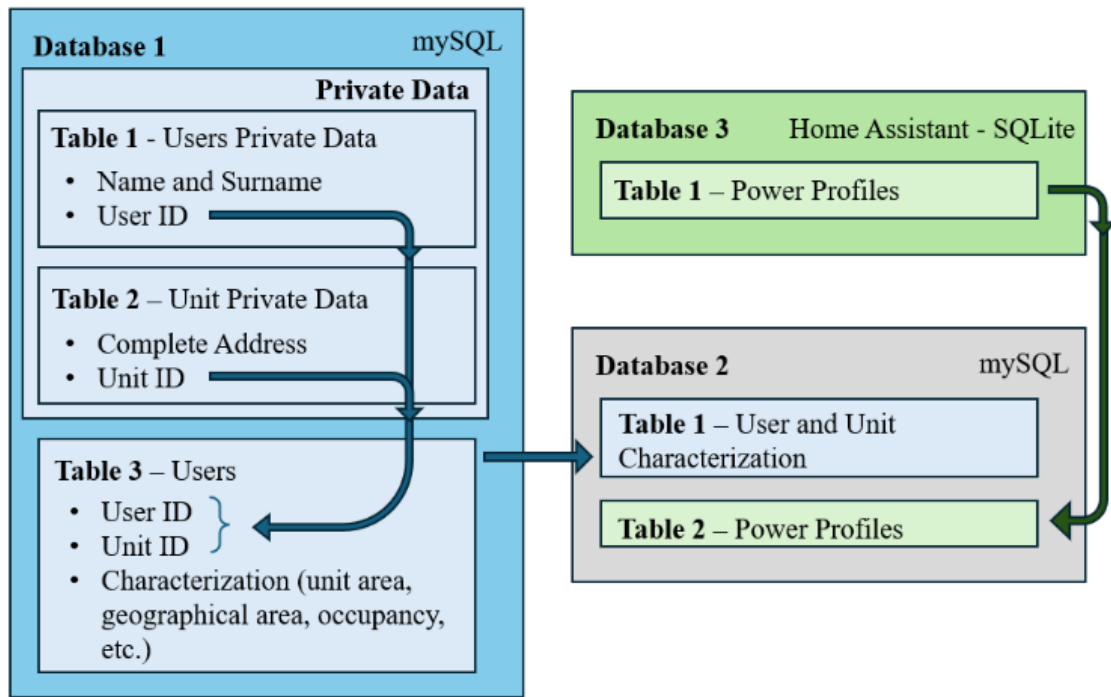


Figura 94 Descrizione dei database della piattaforma

Script di gestione: è dedicato all'elaborazione delle informazioni contenute nei csv risultanti dalla compilazione dei due form e al loro inserimento nel database 1. Tramite più script Python vengono letti i dati provenienti dai form e, se vengono individuati nuovi utenti, vengono compilate le tre tabelle del database. Uno script indipendente si occupa inoltre della creazione di nuovi utenti sull'istanza di Home Assistant utilizzando username e password scelti dall'utente durante la compilazione del form.

- **Nodered:** è un software open source di programmazione a blocchi molto utile per la gestione dei flussi dati. I blocchi, scritti in JavaScript, sono infatti organizzati in flussi dove l'output di un blocco viene passato come input del blocco successivo. All'interno della piattaforma è stato utilizzato principalmente per contattare il cloud Shelly

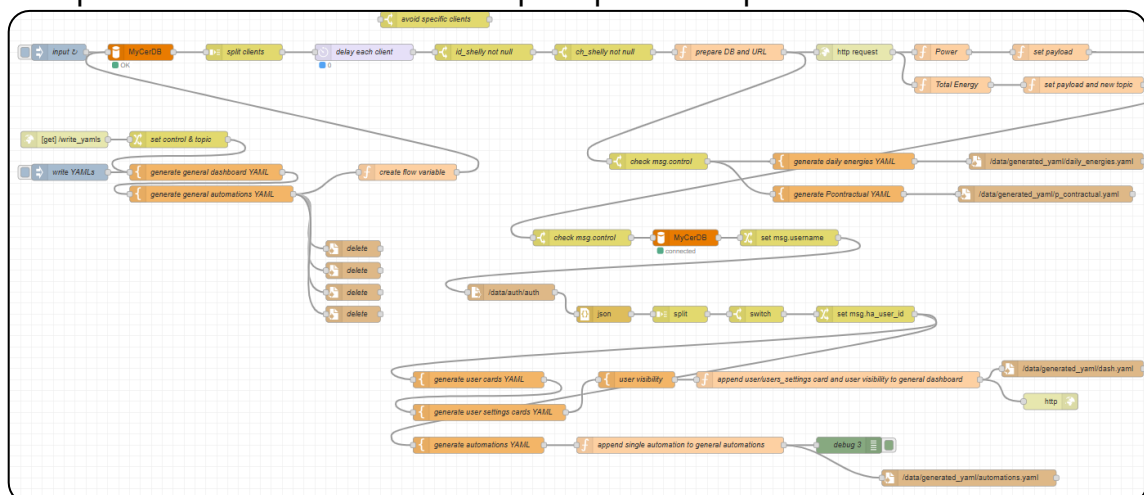


Figura 95 Flusso NodeRed di gestione dei dati

utilizzando i dati salvati nel database 1, prelevare i dati in tempo reale sui consumi energetici e aggiornare di conseguenza lo stato dell'entità associate a quel profilo. Nel caso di un nuovo utente si occupa anche di generare la relativa entità tramite API e la dashboard associata tramite compilazione e upload di file YAML.

- **Home Assistant:** è il cuore della piattaforma. Sebbene sia pensato per applicazioni di domotica, la sua versatilità lo rende uno strumento utile in generale nella gestione di sistemi IoT. All'interno della piattaforma ha molteplici ruoli: riceve e storicizza i dati provenienti dai misuratori (tramite Nodered), costruisce e gestisce l'interfaccia grafica utenti tramite dashboard potenti ma intuitive, gestisce gli utenti e gli accessi alla piattaforma tramite autenticazione. È stato customizzato ed arricchito di integrazioni per ampliare le sue funzionalità, in particolare per quanto riguarda gli aspetti front-end.
- **Web page:** è lo stadio finale della piattaforma. Tramite codici HTML, CSS e JavaScript espone sul web un'interfaccia grafica finalizzata al download dei profili di consumo raccolti in forma anonima da parte di eventuali enti di ricerca interessati. L'organizzazione della pagina è molto semplice: sono presenti numerosi filtri sul tipo di unità residenziale, metratura, numero e tipologia di inquilini, tipologia di impianti tecnici presente, ecc, rispecchiando le opzioni inserite nei form. Attivando un filtro sulla base delle proprie esigenze, il web server interroga il database 2 e restituisce nella parte inferiore della pagina il numero di profili corrispondenti trovati e abilita il tasto per il download degli stessi (in basso a destra). I dati verranno quindi scaricati sottoforma di due file csv, l'uno contenente i profili con la massima estensione temporale

Figura 96 Web Page di condivisione dei dati

a disposizione associati a un ID anonimo e l'altro contenente tutti i parametri di caratterizzazione del profilo, associati anche in questo caso all'ID anonimo.

L'interfaccia grafica utente (GUI)

La gestione dell'interfaccia grafica generata da Home Assistant è stata molto curata. Il primo aspetto sviluppato è quello relativo ai permessi di accesso degli utenti: le dashboard sono state organizzate in più pagine una per ogni aggregazione di utenti (pensato per una predisposizione alla gestione di comunità energetiche e attualmente organizzata in condomini), all'interno delle quali sono inserite tutte le schede dei singoli utenti della comunità stessa. Tramite la gestione della visibilità delle pagine e delle schede (parte della configurazione in YAML effettuata tramite Nodered), ogni utente può visualizzare solo ed esclusivamente le schede relative ai propri dati, ad eccezione di un eventuale utente "amministratore di comunità" che sarà in grado di visualizzare l'intera pagina. In realtà le

schede a disposizione di ogni utente sono due (organizzate in altrettante pagine): quella principale che permette di monitorare in tempo reale la potenza istantanea, l'energia consumata nella giornata, e il profilo dei consumi, navigabile e impostabile per una visualizzazione con granulometria variabile (da minuti ad anni); una pagina di configurazione, accessibile tramite un classico pulsante opzioni in alto a destra, che

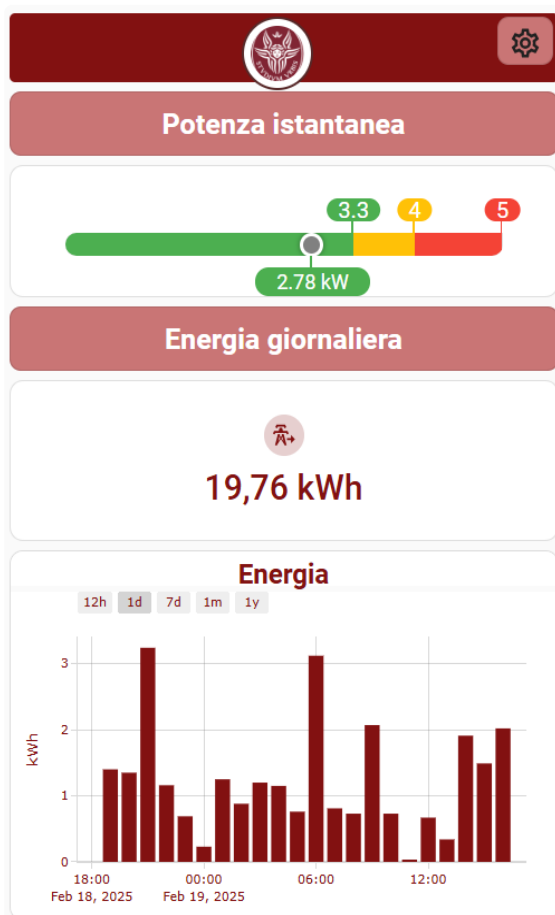


Figura 97 Interfaccia utenti della piattaforma

permette di modificare la potenza contrattuale di soglia e abilitare il servizio di notifica per possibile distacco per sovraconsumo. Infatti, per incrementare il numero di adesioni al programma di monitoraggio, è stata inserita nel progetto la possibilità di ricevere una notifica push sul proprio smartphone al superamento di una potenza impostata, così da avvisare

l'utente prima che avvenga il distacco dalla rete per sovraconsumo. Per quanto personalizzabile, se nel form è stata inserita la potenza contrattuale verrà utilizzato un valore pari a 1.3 volte quest'ultima (in assenza verrà considerata una potenza contrattuale di 3 kW). La gestione di questo servizio è stata programmata nel software Home Assistant e richiede l'installazione sul proprio smartphone dell'applicazione Home Assistant Companion.

In conclusione, ricapitolando e riassumendo i task della piattaforma, sono riportati nei diagrammi a seguire i principali flussi logici della piattaforma, evidenziando la loro attivazione e gli intervalli.

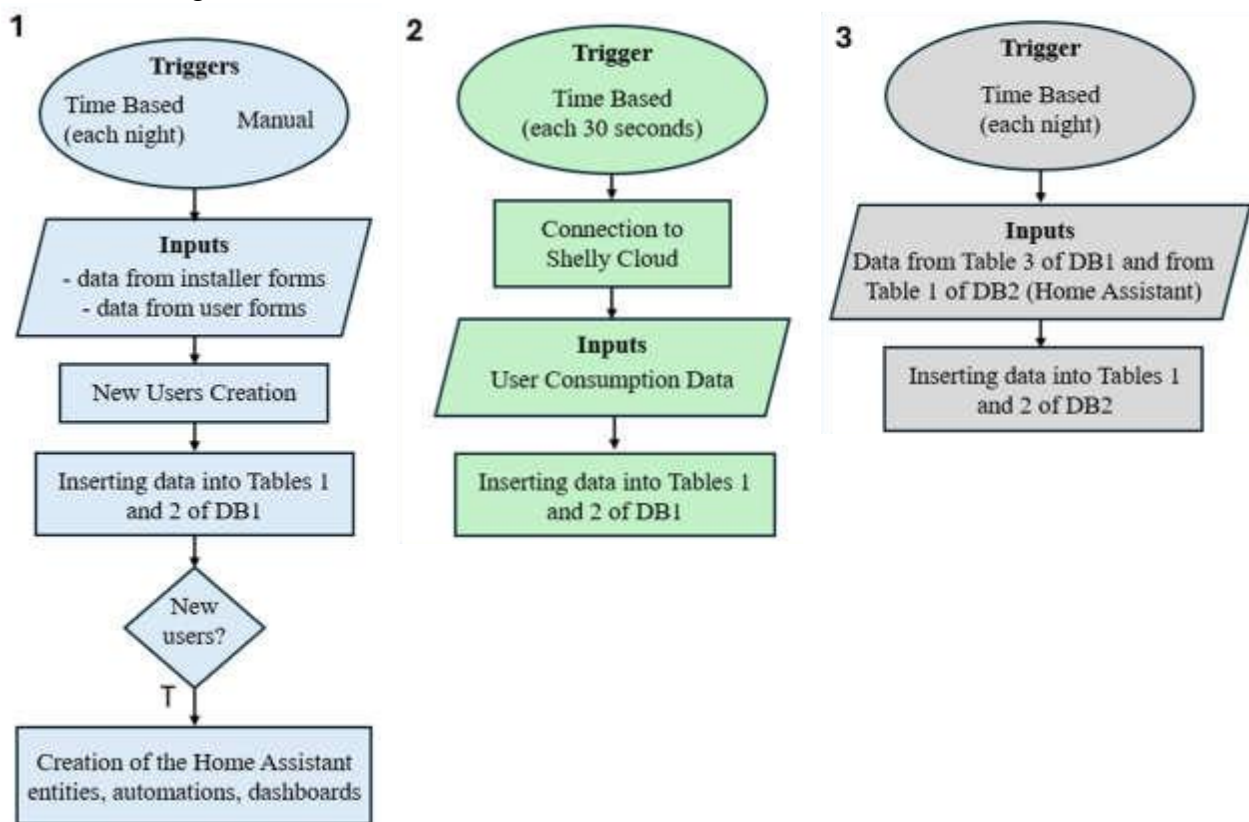


Figura 98 Flussi logici della piattaforma

4.2 Digital Twin

4.2.1 BIMr2DT: integrazione diretta del BIM nel DT

L'integrazione tra Building Information Modeling (BIM) e Digital Twin (DT) costituisce un significativo avanzamento nei processi di progettazione e gestione di edifici, infrastrutture e dei relativi sistemi tecnici. Negli ultimi anni, l'adozione di approcci BIM nella progettazione di strutture e infrastrutture ha registrato una crescita considerevole, fino a divenire un requisito obbligatorio in numerosi progetti, sia pubblici sia privati. Il Digital Twin, a sua volta, si caratterizza per l'integrazione di dispositivi di monitoraggio e controllo in tempo reale delle

grandezze fisiche, con la possibilità di visualizzarne l'andamento e azionare eventuali attuatori tramite rappresentazioni tridimensionali dinamiche.

L'impiego congiunto di queste tecnologie consente di ottimizzare le prestazioni degli asset, ridurre i costi operativi e incrementare la sostenibilità complessiva dei processi di progettazione e gestione. Tuttavia, i modelli BIM tradizionali risultano privi di riferimenti agli aspetti legati all'automazione degli edifici, in quanto non includono informazioni relative ai parametri di comunicazione tra i dispositivi. Tali aspetti devono essere integrati in un secondo momento, comportando attività aggiuntive sia in termini di tempo che di risorse economiche, comprendendo nella maggior parte dei casi una fase di progettazione del sistema di building automation e una successiva elaborazione del Digital Twin.

Parallelamente, la creazione di un Digital Twin indipendente dal modello BIM porta spesso a una duplicazione del lavoro già svolto nella fase di progettazione, con conseguenti inefficienze. Alla luce di queste considerazioni, si propone un'estensione innovativa della classificazione IFC esistente, finalizzata a definire un approccio metodologico che consenta l'integrazione diretta, all'interno del modello BIM, delle informazioni necessarie alla rappresentazione digitale dei sistemi di comunicazione e automazione presenti nell'edificio.

Attraverso tale arricchimento semantico del modello BIM, diventa possibile incorporare fin dalla fase progettuale tutti i riferimenti ai dispositivi di campo installati. Il modello così strutturato risulterà quindi predisposto all'acquisizione e alla visualizzazione in tempo reale dei dati fisici misurati, rendendolo pienamente idoneo a rappresentare una forma iniziale del Digital Twin dell'asset considerato [50].

L'idea alla base del modello sperimentato per la realizzazione di un Digital Twin partendo da un modello BIM già elaborato è la seguente: la fase di progettazione e setup del sistema di building automation verrà effettuata in ambiente BIM, uniformandosi al trend di sviluppo tecnologico che ha coinvolto tutti gli altri settori di progettazione legati all'edilizia. In questo modo, il modello finale dell'opera, risultato della progettazione in BIM, risulterà già arricchito di tutte quelle informazioni necessarie ad una piattaforma di Digital Twin per la comunicazione (anche bidirezionale) con tutti i dispositivi di campo previsti dal progettista di building automation, ottenendo dunque un modello pronto per essere caricato in piattaforma senza necessitare di lavorazioni successive.

Per ottenere ciò sono necessari tre elementi:

- un software di progettazione IoT che possa lavorare in ambiente BIM (attualmente non disponibile in commercio) che, ereditando il modello dalle fasi di progettazione precedenti, consenta di calarvi sopra gli aspetti legati alla comunicazione con i dispositivi di campo;
- un set di “regole” condivise standardizzate per permettere l’interoperabilità;
- una piattaforma software di Digital Twin che sposi tale set.

Nei paragrafi a seguire verrà dapprima analizzata una proposta elaborata per questo “set di regole” da introdurre eventualmente nell’alberatura di classi IFC e successivamente una piattaforma di Digital Twin open source sperimentale che, per l’appunto, sposa quest’approccio (o meglio una prima versione dimostrativa di esso).

Classi IFC per la comunicazione IoT

L’interoperabilità è una delle caratteristiche più importanti del mondo BIM. L’elemento chiave per ottenere un’interoperabilità completa è rappresentato dal formato IFC (Industry Foundation Classes), un formato aperto per la gestione dei dati che consente il trasferimento delle informazioni tra diversi software senza perdita o distorsione. L’IFC è concepito per rappresentare l’informazione dell’edificio lungo tutte le fasi del ciclo di vita: dall’analisi di fattibilità, alla progettazione, realizzazione, fino alla manutenzione. Tutti i modelli che utilizzano e rispettano tale standard, registrato come ISO 16739, sono detti modelli BIM IFC.

Lo schema dati IFC è strutturato secondo una gerarchia ad albero costituita da entità, organizzate in classi “padre” e “figlio”: ogni classe “figlia” eredita dalla classe “padre” tutti gli attributi e caratteristiche, aggiungendone di nuove. Il nucleo più astratto e generale dell’alberatura è rappresentato da “IfcKernel”, che fornisce le basi costruttive comuni alla maggior parte degli elementi IFC. All’interno di questo, l’elemento principale è IfcRoot, il supertipo da cui derivano tutte le entità IFC, che definisce attributi fondamentali come identificatori univoci, nomi opzionali e descrizioni. Seguendo la struttura ad albero dall’alto verso il basso, ciascun livello introduce classi che aggiungono ulteriori informazioni, specificando in maniera sempre più dettagliata le caratteristiche delle entità, come illustrato in *Figura 99*.

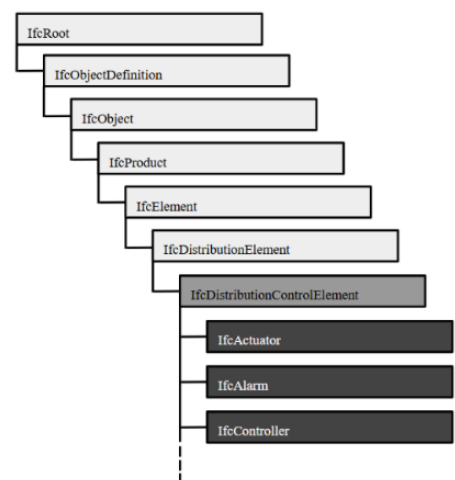


Figura 99 Esempio di alberatura delle classi IFC

La definizione completa di ciascuna entità è dunque determinata dall'appartenenza a più classi e dal possesso di attributi ereditati da elementi superiori o da relazioni con classi appartenenti ad altri sottoalberi.

Attualmente, lo standard IFC non fornisce alcuna classe o attributo dedicati alla definizione dei parametri di comunicazione IoT degli elementi che rappresenta, aspetto invece fondamentale per consentire una facile e immediata integrazione in piattaforme di Digital Twin.

È stata quindi elaborata una proposta per ampliare il pool di classi IFC esistenti con delle nuove entità capaci di definire i parametri di comunicazione direttamente nella fase di progettazione BIM, così da abbracciare, oltre alle fasi di progettazione, costruzione, gestione manutentiva e dismissione, anche quella di gestione dell'opera tramite strumenti digitali avanzati.

La relazione tra l'oggetto IFC BIM che rappresenta il dispositivo e i dati dinamici (cioè le grandezze misurate e/o controllate) segue la stessa struttura dell'associazione `IfcMaterial`. All'interno della classe astratta `IfcRoot` sono incluse tre classi secondarie: `IfcObjectDefinition`, `IfcPropertyDefinition` e `IfcRelationship`, come mostrato in **Figura 100**.

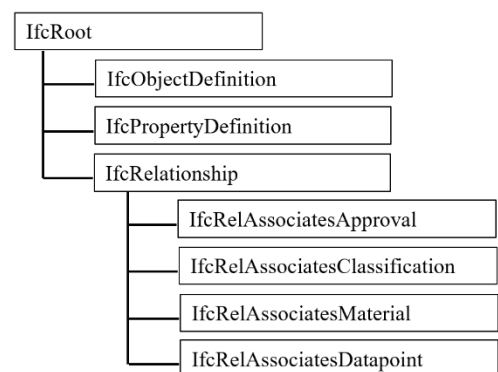


Figura 100 Alberatura di `IfcRoot` e sottoclassi

Analogamente a `IfcRelAssociateMaterial`, si propone una nuova classe chiamata `IfcRelAssociateDatapoint`, che ha come attributo principale un `RelatingDatapoint` e oggettifica la relazione tra `IfcObject` e `IfcDatapointDefinition`. Quest'ultima classe di nuova creazione ha la struttura mostrata in **Figura 101** e comprende due classi IFC secondarie chiamate `IfcDatapoint` e `IfcDatapointSet`, del tutto analoghe alle sottoclassi di `IfcMaterialDefinition`: `IfcMaterial` e `IfcMaterialLayerSet`.

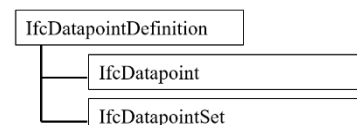


Figura 101 Nuova alberatura per `IfcDataPoint`

L'attributo principale della classe IfcDatapointDefinition è l'associazione con un'istanza della classe IfcRelAssociateDatapoint. La sottoclasse IfcDatapoint è invece la classe principale per la definizione dei parametri e dei protocolli di comunicazione, definendo anche tutti gli attributi necessari per la connessione al dispositivo IoT. La struttura ad albero completa sviluppata è mostrata in **Figura 102**:

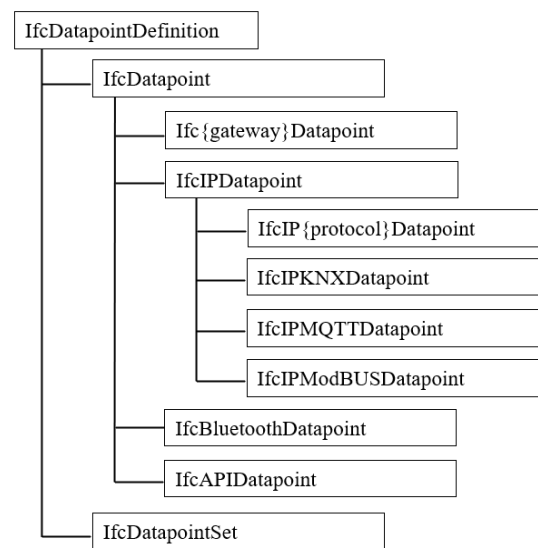


Figura 102 Alberatura completa IfcDatapointDefinition

Gli attributi principali di questa classe, riportati in **Figura 103**, sono parametri comuni a tutti i dispositivi IoT, come UnitOfMeasurement (direttamente collegato a un'istanza di IfcMeasureResource) o CorrectionFactor (istanza di IfcReal che rappresenta un numero in virgola mobile).

IfcDatapoint		
#	Attribute	Type
1	GlobalID	IfcGlobalUniqueId
2	Name	IfcLabel
3	UnitOfMeasurement	IfcMeasureResource
4	CorrectionFactor	IfcReal
5	DataType	IfcText
6	ToDatapointSet	IfcDatapointSet

Figura 103 Parametri di IfcDataPoint

Sotto la classe IfcDatapoint si trovano le classi relative ai diversi gateway possibili. Prendendo come esempio il protocollo IP, la classe IfcIPDatapoint contiene tutti i parametri di connessione per l'acquisizione dei dati provenienti dai gateway IP, come l'indirizzo IP (istanza della classe IfcText), la porta e gli attributi aggiuntivi per un'eventuale autenticazione richiesta (ad esempio, utente e password). All'interno della classe IP sono contenute classi aggiuntive che definiscono gli attributi

necessari per i diversi protocolli che operano sotto IP. MQTT e KNX, rappresentati rispettivamente dalle classi IfcIPMQTTDatapoint e IfcIPKNXDatapoint, ne sono un esempio. Queste classi, contenute in IfcIPDatapoint, forniscono attributi aggiuntivi come Topic e QualityOfService per il protocollo MQTT o GroupAddress e PhysicalAddress tipici del protocollo KNX. Nella *Figura 104* sono mostrati esempi di attributi relativi alle classi IfcIPDatapoint e IfcMQTTDatapoint.

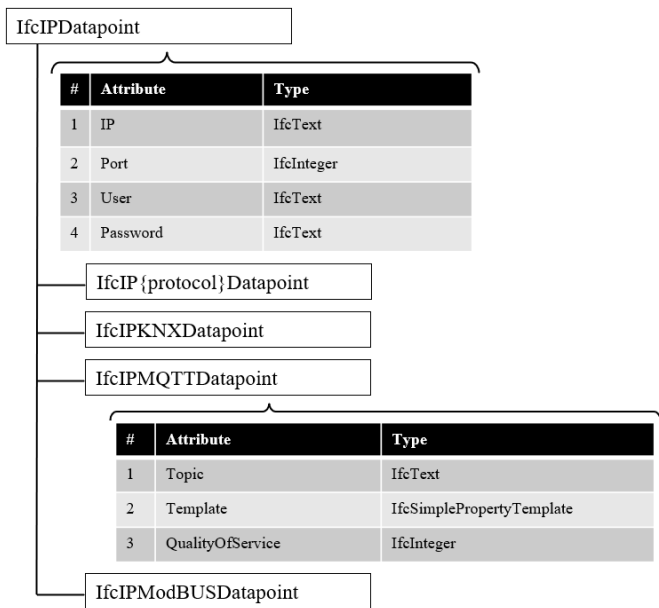


Figura 104 attributi di IfcDatapoint e IfcMQTTDatapoint

Le classi che rappresentano i diversi gateway possono anche non avere sottoclassi, come nel caso di IfcAPIDatapoint. Questa classe possiede tutti gli attributi necessari per una connessione API, come l'URL e i parametri di autenticazione, come mostrato in *Figura 105*.

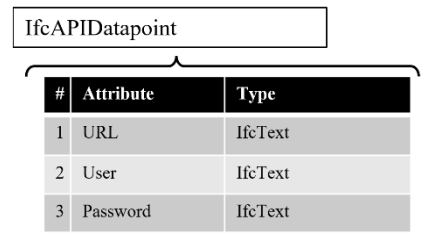


Figura 105 Attributi IfcAPIDatapoint

Un IfcObject può avere più dati in tempo reale che rappresentano diverse grandezze fisiche ad esso correlate. È stata quindi considerata la creazione di una classe chiamata IfcDatapointSet per raggruppare più istanze della classe IfcDatapoint. Ad esempio, la rappresentazione Digital Twin di una pompa di calore può avere dati in tempo reale relativi ai suoi parametri elettrici (come consumo di energia, corrente e tensione) e termici (setpoint in gradi, velocità della ventola, COP, ecc.). Per mettere in relazione tutte le grandezze misurate in tempo reale con l'oggetto IfcObject che rappresenta la pompa di calore, un insieme di tutte le istanze di IfcDatapoint viene raggruppato in un'istanza della classe IfcDatapointSet. L'istanza di IfcRelAssociateDatapoint collega quindi l'istanza di IfcDatapointSet (collegando a sua volta tutte le istanze di IfcDatapoint contenenti gli attributi di comunicazione) all'IfcObject della pompa di calore. Pertanto, nel modello BIM saranno inclusi tutti i parametri di connessione, rendendolo pronto per la comunicazione in tempo reale nella piattaforma Digital Twin e ottenendo quello che è stato chiamato BIMr2DT (BIM ready to Digital Twin).

Piattaforma Digital Twin per BIMr2DT

Al fine di provare la fattibilità di quanto descritto finora, è stata realizzata una piattaforma di Digital Twin in grado di accogliere file IFC arricchiti con i parametri di comunicazione come descritto in precedenza. La piattaforma è stata realizzata sotto forma di Web app sfruttando differenti risorse software open source, integrate in un'architettura unica e affiancate da script Python e TypeScript.

Il file IFC della struttura viene in primis letto ed elaborato sfruttando il modulo fragment della libreria open source IFC.js, ottenendo come output due file:

- un file “**.frag**”, contenente tutte le informazioni geometriche ottimizzate per una visualizzazione 3D agile e leggera. Ogni elemento del progetto viene suddiviso in molteplici parti, chiamate appunto frammenti, facilitando in questo modo la sua gestione in fase di visualizzazione;
- un file “**.json**” dedicato alle proprietà, sia statiche che dinamiche, contenute nell'IFC e ai metadati di collegamento tra i due file stessi. L'utilizzo di un formato molto comune, versatile e con una formattazione di facile interpretazione come il formato Json, favorisce l'accesso alle informazioni contenute al suo interno da entità software terze, come gli script Python che verranno introdotti successivamente.

I frammenti vengono quindi presi in carico dal modulo components della stessa libreria, tramite il quale è possibile gestire la visualizzazione grafica, sia per quanto riguarda la renderizzazione 3D, sia per quanto riguarda le viste, la posizione camera, la gestione degli input e la visualizzazione dei dati dinamici. Per assolvere a queste funzioni, il modulo components si appoggia ad un'altra libreria open source, Three.js, dalla quale eredita funzioni e metodi per la gestione e visualizzazione dei componenti 3D.

I dati contenuti nel Json vengono invece elaborati da uno script Python che legge il file e cerca al suo interno tutti i parametri utili al corretto funzionamento del Digital Twin, in primis quelli necessari all'interrogazione dei dispositivi comunicanti integrati nel progetto. Viene quindi creato un secondo file Json, molto più leggero e leggibile di quello originale, dedicato alla comunicazione con i dispositivi di campo. Al suo interno vengono salvati tutti i dispositivi comunicanti, le variabili che mettono a disposizione (sia in lettura che in scrittura), il protocollo di comunicazione utilizzato, i riferimenti alle variabili stesse e le specifiche per la loro corretta interpretazione. Ad esempio, un multimetro Modbus sarà presente all'interno del file associato alle variabili di tensione, corrente, fattore di potenza, potenza attiva reattiva e apparente, frequenza, ecc. e per ognuna di queste grandezze saranno indicati: indirizzo

IP e porta del gateway, ID ModBus del dispositivo, numero di registri, registro, tipo di variabile (sia in termini di formato che in termini di modalità di accesso), fattore di conversione e unità di misura.

A questo punto la piattaforma ha tutte le informazioni necessarie ad instaurare la comunicazione con il mondo reale: tramite un secondo script Python vengono interrogati i dispositivi IoT e i dati ottenuti vengono salvati con l'intervallo di campionamento desiderato all'interno di un database. Per il database si è scelto di utilizzare InfluxDB, un database temporale, anch'esso open source, ottimizzato per contenere serie storiche di dati, in quanto caratterizza il dato sulla base del momento della sua acquisizione, con il timestamp come indice principale (a differenza dei classici database che presentano come indice un intero incrementale).



Figura 106 Schermata di visualizzazione del database InfluxDB

Il database costituisce un elemento centrale nell'architettura della piattaforma in quanto viene continuamente interrogato dal motore grafico per mostrare sul render 3D le informazioni in tempo reale e lo stato dell'infrastruttura nel passato, selezionabili tramite uno slider temporale. La visualizzazione delle informazioni può avvenire in molteplici modalità:

- **finestra componente:** cliccando su un componente IoT apparirà una finestra con tutte le informazioni che il componente stesso mette a disposizione
- **pannello tematico:** ai lati della schermata sono presenti dei selettori di classi di grandezze (temperatura, potenza, corrente, tensione, ecc.) tramite i quali si accede alle misure di tutte le variabili appartenenti a quella classe

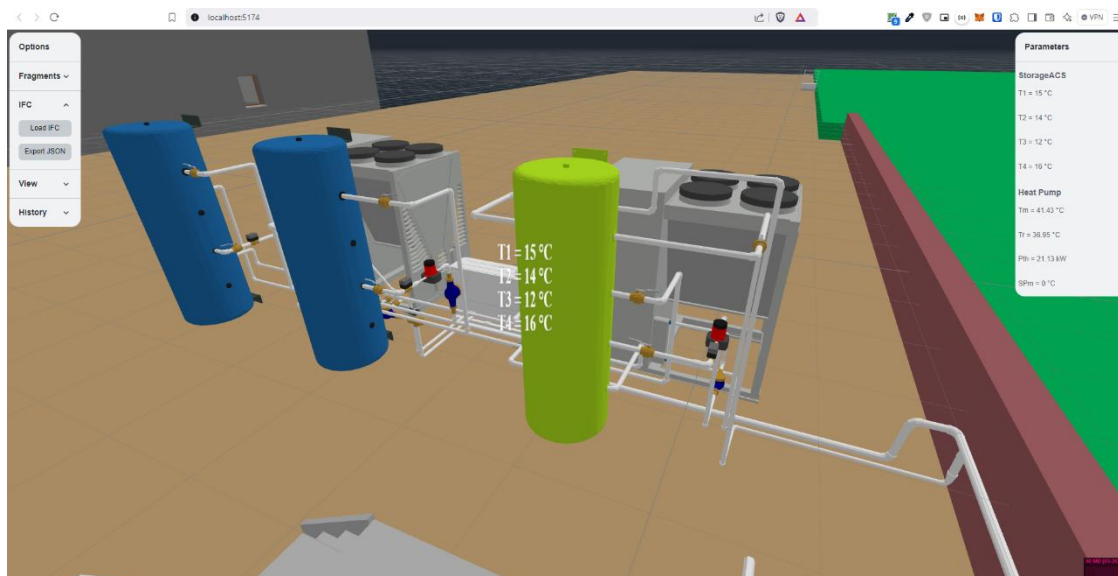


Figura 107 Digital Twin rete S.A.P.I.EN.T.E

- **scale cromatiche:** utilizzando gli stessi selettori i vari elementi del modello assumeranno delle colorazioni in base all'entità della grandezza a loro associata (selezionando ad esempio la potenza, i cavi dove sta passando più potenza verranno visualizzati con una colorazione tendente al rosso mentre quelli più scarichi risulteranno blu)
- **dati storici:** è possibile visualizzare i dati storici sia interrogando direttamente il database sulla sua interfaccia grafica, sia direttamente dal Digital Twin, potendo andare indietro nel tempo tramite uno slider temporale.

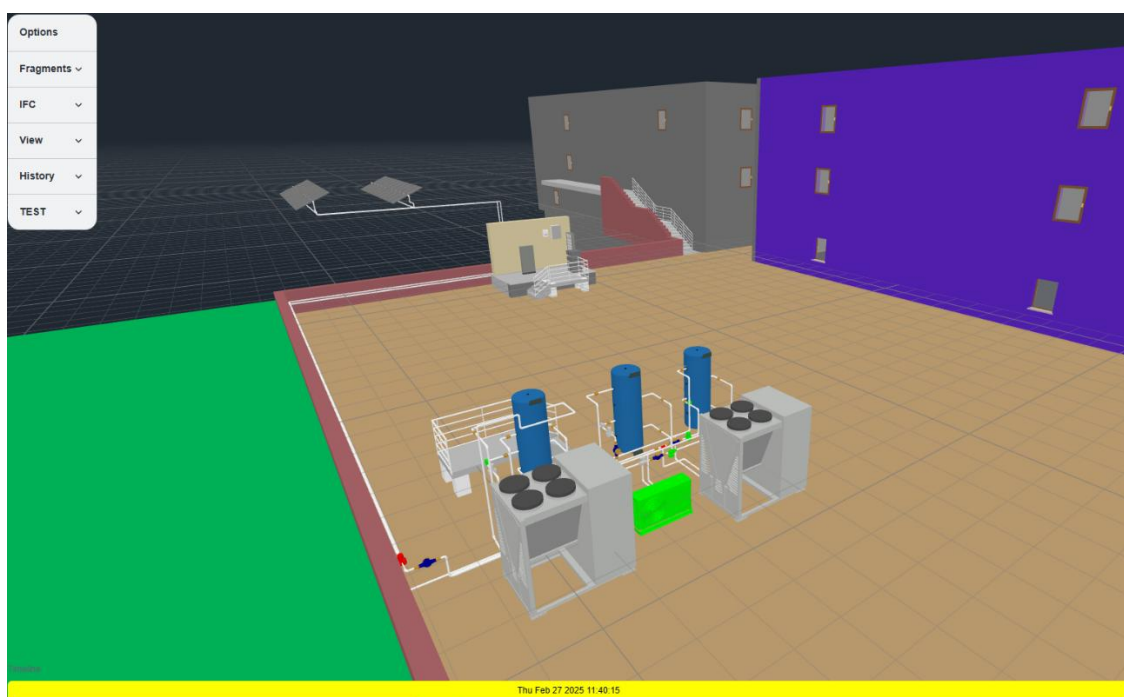


Figura 108 Digital Twin rete S.A.P.I.EN.T.E - Slider temporale

Queste modalità di visualizzazione vengono gestite da script TypeScript.

L'architettura della piattaforma consente inoltre di inserire al suo interno eventuali algoritmi di automazione scritti nei principali linguaggi di programmazione attualmente disponibili, senza imporre alcun tipo di limite.

L'accesso alla piattaforma avviene semplicemente tramite web browser, collegandosi direttamente col proprio computer al server che la ospita tramite indirizzo IP interno se ci si trova il loco o si è collegati alla stessa rete tramite VPN (collegamento da remoto), o indirizzo IP pubblico o URL (nel caso di servizio Ddns attivo) e relativo tunneling in caso di collegamento da remoto senza utilizzo di VPN.

Per quanto sia possibile, con alcuni accorgimenti aggiuntivi, utilizzare la piattaforma tramite servizi cloud, il suo utilizzo naturale è quello locale. Viene installata su una macchina collegata alla stessa rete LAN del supervisore/concentratore/gateway IP della rete IoT e portata online, se necessario, tramite servizi come Cloudflare.

Lo sviluppo della piattaforma sottoforma di web app la rende estremamente snella dal punto di vista dello sforzo di elaborazione, necessitando quindi di capacità computazionali moderate rispetto alle funzioni svolte: lo sforzo computazionale relativo all'elaborazione grafica delle viste 3D viene trasferito al computer che in quell'istante sta visualizzando il Digital Twin, consentendo connessioni simultanee multiple senza appesantire eccessivamente la macchina. Questa caratteristica permette di scegliere come server dispositivi con risorse limitate e costi contenuti; la scelta più comune ricade solitamente su vecchi computer dedicati già disponibili nell'impianto, macchine virtuali installate su computer non dedicati, o nel caso in cui nessuna di queste opzioni fosse disponibili, mini-computer o single-board computer come Intel Nuc o più spesso semplicemente Raspberry Pi 5.

4.2.2 Case Study: ADLAS - Micro-rete S.A.P.I.E.N.T.E. (ENEA)

Il primo utilizzo sperimentale della piattaforma e del BIMr2DT è stato effettuato in collaborazione con il centro di ricerca di ENEA a Casaccia. In particolare, la metodologia e le tecnologie sviluppate sono state messe in pratica per la realizzazione di un Digital Twin al servizio della micro-rete sperimentale S.A.P.I.E.N.T.E. con l'obiettivo di fornire uno strumento in grado di gestire i flussi di potenza della rete e di svolgere sperimentazione sul demand-side-management in modo fluido e consapevole.

S.A.P.I.E.N.T.E.

Il sistema sperimentale **S.A.P.I.E.N.T.E.** (Sistema per l'Accumulo e la Produzione Integrata di ENergia Termica ed Elettrica) è stato realizzato presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia, con l'obiettivo di testare in ambiente controllato e su scala reale strategie avanzate per l'integrazione e l'ottimizzazione dell'autoconsumo di fonti rinnovabili in contesti multiutenza. Il sistema si configura come una micro-rete ibrida, a doppia natura termica ed elettrica, equipaggiato con sistemi di generazione di energia da fonti rinnovabili, un classico impianto fotovoltaico e uno termo-fotovoltaico, due sistemi di accumulo di energia, uno elettrico e uno termico, e sistemi per la simulazione di carichi termici ed elettrici multi-utenza.

L'impianto può essere suddiviso in due sezioni principali: quella elettrica e quella termica.

La **sezione elettrica** integra:

- un impianto fotovoltaico tradizionale da 11,6 kW
- un impianto termofotovoltaico da 6,4 kW elettrici
- tre banchi di supercondensatori con capacità di accumulo complessiva di 14kWh
- un inverter ibrido per la gestione del termofotovoltaico e dei supercondensatori
- un carico elettronico bidirezionale da 10kW controllabile in ModBus per la simulazione di carichi residenziali e/o veicoli elettrici
- tre riscaldatori d'acqua a resistenza a servizio degli accumuli termici

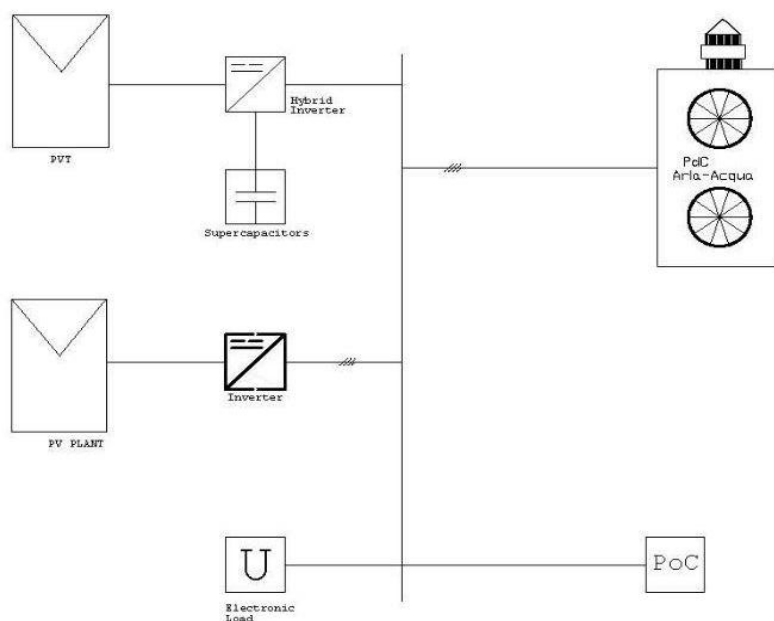


Figura 109 Rete S.A.P.I.E.N.T.E. - layout schema elettrico

La **sezione termica** invece è costituita da:

- una pompa di calore aria/acqua con compressore modulabile e interfaccia ModBus RS485 da 13 kW elettrici
- tre serbatoi di accumulo ad acqua, uno da 1000 litri dedicato all'acqua calda sanitaria e due da 1500 litri per i sistemi di riscaldamento e raffreddamento
- due dry cooler da 70 kW termici modulabili, impiegati per emulare carichi termici variabili (uno per l'acqua calda sanitaria e uno per la termoregolazione)
- due valvole a tre vie per la selezione dei circuiti idraulici, la prima che collega la pompa di calore alternativamente alla sezione ACS e a quella di riscaldamento/raffrescamento e la seconda che permette la selezione tra i due storage termici di riscaldamento e raffreddamento.

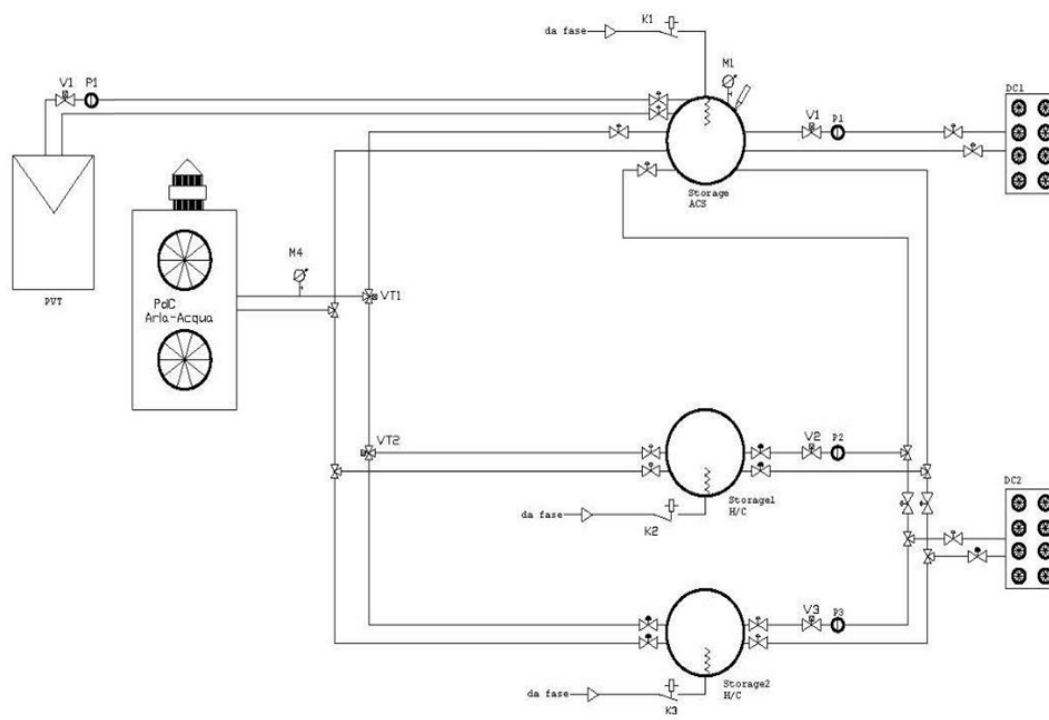


Figura 110 Rete S.A.P.I.EN.T.E. - layout impianto termico

È inoltre presente sistema di controllo costituito da un PLC predisposto alla comunicazione con le apparecchiature in campo tramite protocollo ModBUS Seriale (RS485), al quale convergono, sempre in modBUS Seriale, dei moduli secondari di espansione per la lettura e scrittura di segnali analogici e digitali diretti. Sono presenti quindi due BUS ModBUS facenti capo entrambi al PLC, dove il primo è dedicato ai moduli secondari del PLC per la

gestione dei sensori di temperatura, delle valvole a 2 vie e dei riscaldatori elettrici, mentre sul secondo convergono la pompa di calore, 5 misuratori entalpici, i due inverter, sensori di potenza elettrica, centraline delle pompe di ricircolo e i moduli di regolazione dei dry-cooler.

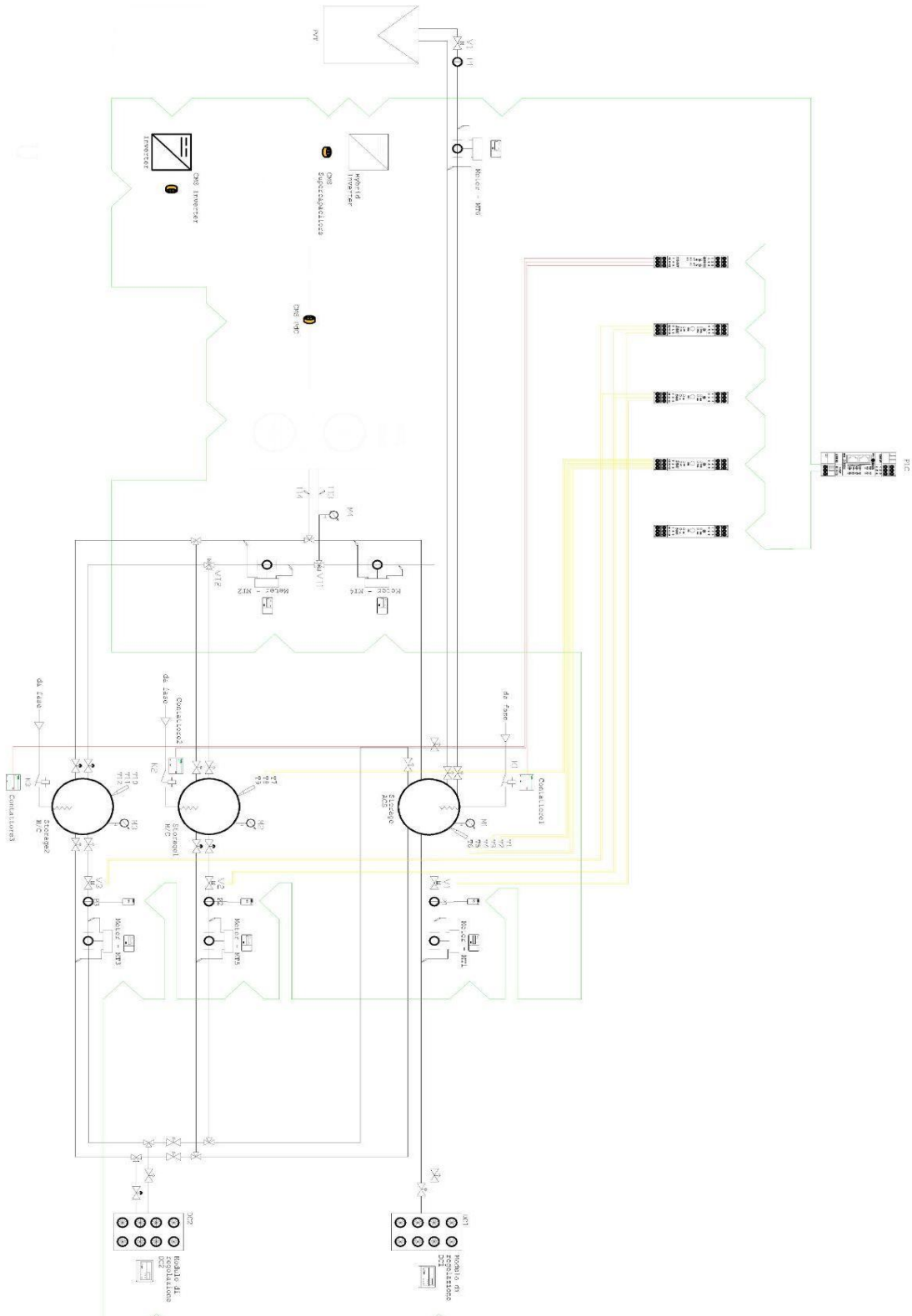


Figura 111 Rete S.A.P.I.EN.T.E. - layout sistema Modbus

BIMr2DT

Il primo step per lo sviluppo del modello BIMr2DT è stato chiaramente quello di riprodurre il sistema in ambiente BIM secondo la metodologia classica, utilizzando il software di BIM editing Autodesk Revit. Il modello è stato realizzato focalizzando l'attenzione in particolare sugli elementi della rete elettrica e idraulica, riproducendo in maniera simbolica tutti gli elementi di secondario interesse come ad esempio muri, supporti dei pannelli fotovoltaici, pavimentazione esterna ecc. Senza addentrarci troppo nella spiegazione di questa fase, in quanto esula dall'obiettivo di questo elaborato, si riportano semplicemente dei confronti tra le foto dell'impianto reale e il risultato digitale ottenuto.



Figura 112 Confronto digital twin-reale dry cooler e pompa di calore



Figura 113 Confronto digital twin-reale cabina impianto termico

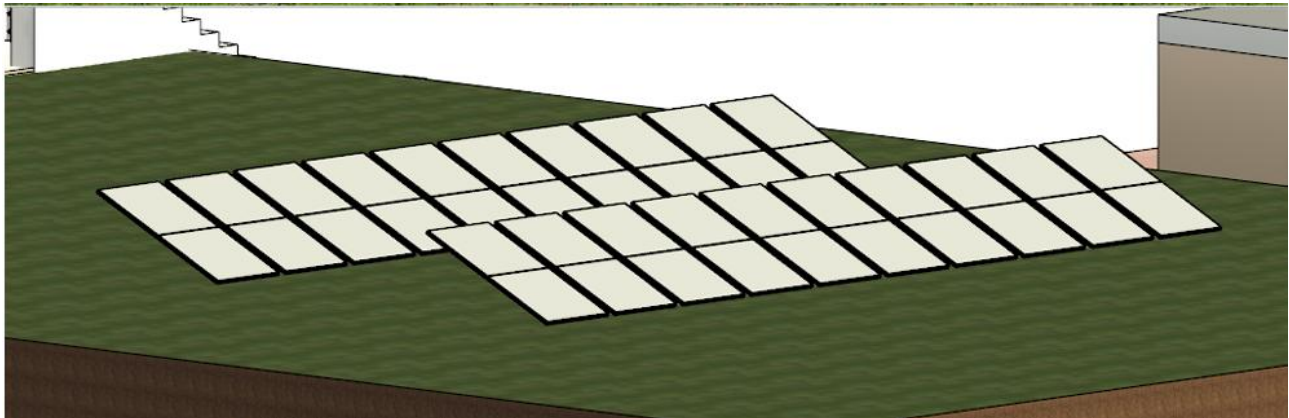


Figura 115 Confronto digital twin-reale impianto termofotovoltaico



Figura 114 Confronto digital twin-reale cabina elettrica

Mentre il modello completo è riportato nell'immagine seguente:

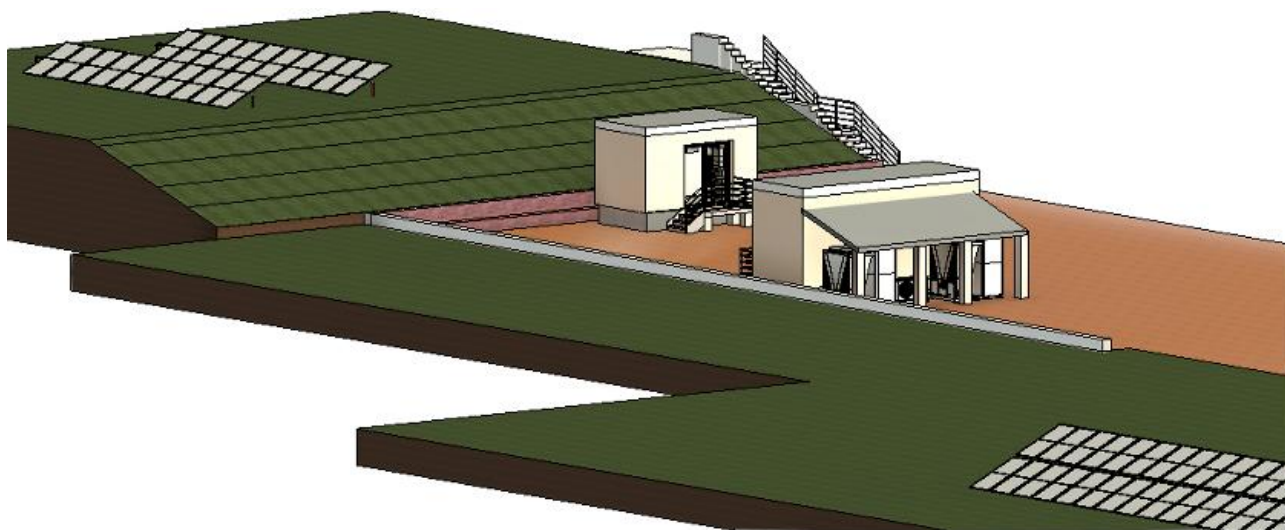


Figura 116 Modello completo della rete S.A.P.I.EN.T.E

Il risultato ottenuto in questa prima fase è un modello BIM tradizionale, senza alcun tipo di proprietà riferita al sistema IoT. Per poterlo trasformare in un modello BIMr2DT sarebbe necessario importarlo in un software di progettazione di building automation BIM e riempire le nuove classi IFC di comunicazione proposte nel capitolo “BIMr2DT: integrazione diretta del BIN nel DT”, tuttavia, allo stato attuale, non esiste né il software né tali classi IFC.

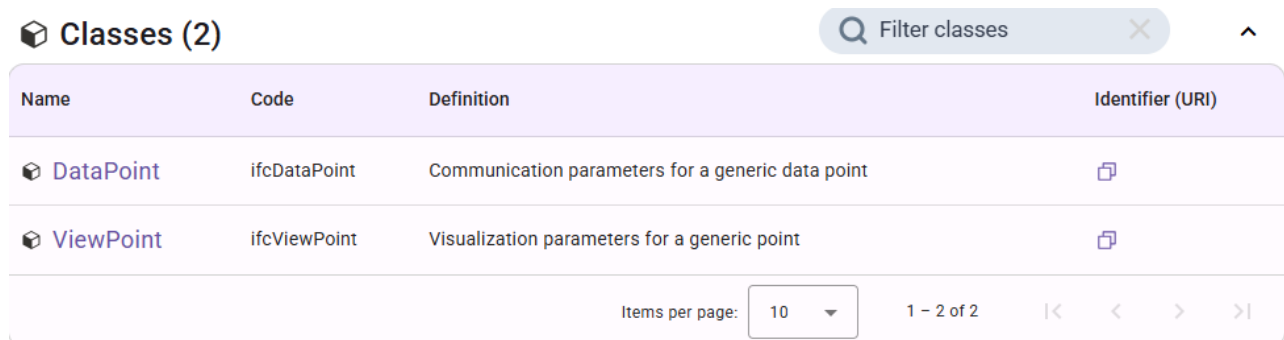
Per quanto riguarda le classi IFC, il loro inserimento nelle alberature standardizzate è competenza dell'organizzazione buildingSMART International e dovrebbe seguire un iter procedurale lungo e complesso. La prima soluzione alternativa tentata è stata quella di creare dei CustomPropertySet utilizzando differenti software di BIM editing (tra cui lo stesso Revit): Per ogni singola variabile si crea un set di proprietà, indicando nome della proprietà e valore associato, con la cura di impostare di volta in volta un nome differente per i diversi property set. Il risultato, per quanto poco elegante in termini di rappresentazione dei dati e di possibilità di errori durante il loro inserimento e poco efficiente in termini di tempo è stato comunque efficace e ha consentito l'inserimento dei dati necessari alla comunicazione tra piattaforma Digital Twin e dispositivi in campo.

La seconda, e al momento definitiva, soluzione adottata è stata quella di creare dei dizionari di dati sul portale dedicato di buildingSMART. Un bSDD (buildingSMART Data Dictionary), a differenza di un CustomPropertySet che risulta essere poco più di una lista di chiavi-valori associati ad un oggetto IFC, consiste in un set prefissato e condiviso di proprietà e attributi ben definiti. Ogni singola proprietà che viene inserita in un bSDD può essere caratterizzata con Data Type (stringa, numero intero, numero reale, ecc), flag “Is required” e “Is writable”,

valori predefiniti, liste di valori permessi, limiti minimi e massimi per valori numerici, ecc. rendendo il bSDD molto più di un semplice PropertySet.

Anche dal punto di vista del suo utilizzo risulta molto più snello e guidato: è sufficiente importare il bSDD in qualsiasi software di BIM editing e associarlo all'oggetto comunicante per ottenere tutti i campi contenuti nel bSDD pronti per la compilazione.

Il bSDD creato introduce due nuove classi: DataPoint, contenente i parametri utili alla corretta comunicazione con i dispositivi IoT, e Viewpoint contenente parametri per caratterizzare l'oggetto comunicante all'interno della piattaforma di Digital Twin.



Name	Code	Definition	Identifier (URI)
 DataPoint	ifcDataPoint	Communication parameters for a generic data point	
 ViewPoint	ifcViewPoint	Visualization parameters for a generic point	

Figura 117 Classi BSDD DataPoint e ViewPoint

La classe DataPoint contiene una lista di 113 proprietà, di cui 3 attributi:

- DTDisplayName: di tipo String, utile a definire il nome che l'oggetto associato mostrerà all'interno della piattaforma
- ObjectType: di tipo String, utile a specificare che tipo di oggetto è associato (pompa di calore, ventola, pompa, valvola, ecc). In realtà questo parametro è già presente all'interno della struttura standard IFC ma ridondarlo ci ha consentito una gestione più agevole e un'identificazione più facile della tipologia di elemento.
- SearchCode: di tipo String, con valore di default non modificabile, utile per la ricerca degli elementi comunicanti all'interno del file IFC.

E 10 set "IfcDataPointX" (con "X" che va da 1 a 10, espandibile in futuro) di 10 proprietà ripetute da attribuire non più all'oggetto ma alla singola variabile che l'oggetto espone, pensate al momento per variabili ModBus. La necessità di creare un numero finito di "IfcDataPoint" numerati nasce dall'impossibilità di creare alberature su più livelli. Le proprietà contenute in ogni IfcDataPoint sono le seguenti:

- DataClass: di tipo String, per la selezione della "classe" della variabile, compilabile con uno di 13 valori attualmente disponibili: temperatura, umidità, pressione, flusso,

potenza, energia, tempo, volume, velocità, stato di carica. Questo parametro consente di suddividere i vari dati esposti sulla piattaforma in schermate dedicate.

- **ConversionFactor:** di tipo Real, contenente un valore numerico per il quale moltiplicare il valore estratto dal registro ModBus (è pratica comune in ModBus estrarre dati numerici sottoforma di interi da scalare successivamente tramite appunto fattori di conversione). Di Default il valore è unitario.
- **DataAccess:** di tipo String, indica se la variabile è disponibile in lettura, scrittura o entrambe (R, W, RW).
- **DataPointName:** di tipo String, contenente il nome della variabile.
- **ID:** di tipo Integer, per indicare il ModBus ID del dispositivo
- **IP:** di tipo String, contenente l'indirizzo IP del gateway IP/ModBus
- **Port:** di tipo Integer, la porta di comunicazione IP
- **Register:** di tipo String, contenente il registro ModBus
- **Show:** di tipo Integer, utile a specificare l'ordine di visualizzazione del parametro all'interno della piattaforma
- **SystemName:** di tipo String, utile ad identificare il sistema di appartenenza della variabile (ad esempio la pompa di calore può avere variabili appartenenti al sistema elettrico e variabili appartenenti a quello idraulico). Anche questo parametro esiste già nella normale standardizzazione IFC ma in riferimento al singolo elemento e non alla specifica variabile.
- **UnitOfMeasurement:** di tipo String, utile a specificare l'unità di misura in cui viene espressa la variabile prelevata

Per quanto riguarda l'inserimento dei dati, non avendo a disposizione software BIM di progettazione di Building Automation, i parametri sono state popolati direttamente in Revit.

Name	Data type	Units	Definition	Dictionary	Identifier (URI)
^ Attributes					
DTDisplayName	String		Device name in Digital Twin	DREAM - Ready 2 Digital Twin	 ▼
ObjectType	String		Type of the DataPoint object	DREAM - Ready 2 Digital Twin	 ▼
SearchCode	String		Search code for DREAM	DREAM - Ready 2 Digital Twin	 ▼
^ ifcDataPoint1					
DataClass1	String		Parameter data class	DREAM - Ready 2 Digital Twin	 ▼
ConversionFactor1	Real		Conversion factor	DREAM - Ready 2 Digital Twin	 ▼
DataAccess1	String		Data access	DREAM - Ready 2 Digital Twin	 ▼
DataPointName1	String		Name	DREAM - Ready 2 Digital Twin	 ▼
ID1	Integer		ID	DREAM - Ready 2 Digital Twin	 ▼
IP1	String		IP address	DREAM - Ready 2 Digital Twin	 ▼
Port1	Integer		Port	DREAM - Ready 2 Digital Twin	 ▼
Register1	String		Register	DREAM - Ready 2 Digital Twin	 ▼
Show1	Integer		Show value in Digital Twin, 0 = hide, 1-n = show	DREAM - Ready 2 Digital Twin	 ▼
SystemName1	String		List of systems name to which this parameter belongs	DREAM - Ready 2 Digital Twin	 ▼
UnitOfMeasurement1	String		Unit of measurement	DREAM - Ready 2 Digital Twin	 ▼

Figura 118 Attributi di IfcDataPoint nel BSDD

Piattaforma

La piattaforma di Digital Twin è stata utilizzata, con qualche arricchimento, per il monitoraggio, la supervisione e la gestione automatica della rete S.A.P.I.EN.T.E: il progetto ADLAS (Automatized DSM Logics Application System).

È stata installata in un Raspberry PI 5 con sistema di raffreddamento attivo tramite dissipatore metallico e ventola, scheda di memoria microSD da 126 GB, in un case stampato 3D predisposto per la futura installazione di moduli di memoria aggiuntivi come hard disk SATA SSDs o M.2 SSDs in slot dedicati, il tutto a formare il server ADLAS. Il server è stato quindi



Figura 119 Server on promise della piattaforma

installato in situ, nella stessa rete LAN del gateway IP del sistema, con possibilità di accesso da remoto tramite VPN.

Oltre al motore grafico (Digital Twin in *Figura 120*), il database e gli script Python di gestione del modello e della comunicazione, sono state sviluppate due funzione aggiuntive: una

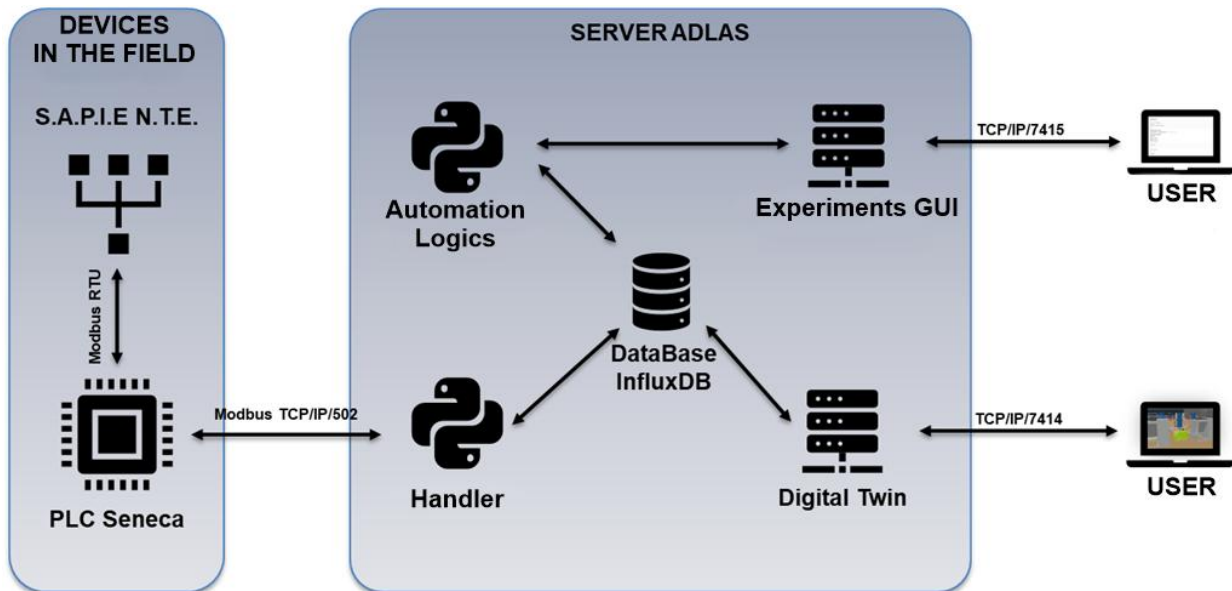


Figura 120 Schema di funzionamento logico della piattaforma

gestione attiva dell'intera micro-rete tramite algoritmi di automazione programmati in Python, e un'interfaccia grafica per il setup delle varie prove sperimentali.

È da sottolineare come gli script di gestione della comunicazione non abbiano necessitato di alcuna modifica o parametrizzazione per instaurare una corretta comunicazione con il PLC Seneca (gateway ModBus/IP), in quanto, in linea con la filosofia del BIMr2DT, tutte le informazioni necessarie erano già contenute nel modello IFC caricato nella piattaforma.

Gli algoritmi di automazione elaborati ad-hoc seguono diverse logiche: una generale, per la gestione dei flussi di potenza, e altre secondarie per la gestione dei singoli componenti o rami di impianto:

- Gestione dei dry cooler: I due dry cooler, utilizzati per simulare i carichi termici ACS e di riscaldamento/raffrescamento, vengono modulati in potenza variando la velocità dei ventilatori, con l'obiettivo di eguagliare la potenza termica rilevata dai misuratori entalpici installati a ridosso dei dry cooler stessi con quella desiderata (proveniente da profili caricati nel sistema sottoforma di file .csv).
- Gestione delle pompe di circolazione verso i dry cooler: viene regolato il flusso di acqua elaborato dalle pompe variando il loro numero di giri, affinché la temperatura

dell'acqua in uscita dai dry cooler eguagli la temperatura minima impostata per gli storage.

- Gestione della pompa di calore: viene modulata, tramite controllo PID, la velocità del compressore in funzione della potenza elettrica obiettivo calcolata dall'automazione generale di gestione dei flussi di potenza.
- Automazione generale: richiede come input la maggior parte dei parametri della microrete, tra cui la potenza al punto di connessione (POC), la priorità di carica e scarica selezionabile tra “elettrica” e “termica”, lo stato di carica dei supercapacitori, le temperature degli accumuli termici, e la differenza tra la potenza della pompa di calore e quella rilevata al POC. Quest'ultimo parametro rappresenta la potenza da assegnare alla pompa di calore per raggiungere un bilancio nullo con la rete, e deve quindi rispettare le soglie di potenza massima e garantire il mantenimento della temperatura di accumulo, in particolare in condizioni di sovraconsumo. In uscita, l'algoritmo restituisce tre comandi principali: la potenza da assegnare ai supercapacitori, la potenza da assegnare alla pompa di calore, e il parametro Racc, che indica se è necessario aumentare o ridurre il numero di resistenze di boost attive nel sistema. L'algoritmo di controllo principale si basa su una logica a regole e opera secondo due modalità: sovrapproduzione e sovraconsumo. In condizioni di sovrapproduzione il sistema cerca di massimizzare l'autoconsumo: in primo luogo verifica se viene superata la potenza massima di carica dei supercapacitori, limitandola se necessario, successivamente, tenendo conto della priorità impostata e dello stato di carica, valuta se la pompa di calore può essere utilizzata per caricare gli accumuli termici (confrontando un valore calcolato con la temperatura massima dell'accumulo). Se tale valore è compatibile, l'algoritmo assegna una potenza alla pompa di calore che consenta di annullare la potenza al POC, compatibilmente con i limiti di sistema, altrimenti la potenza viene limitata al valore massimo, azzerata se la temperatura è già troppo alta, oppure portata al valore minimo di mantenimento, calcolato in funzione della potenza termica richiesta e del COP della pompa di calore. La logica applicata in condizioni di sovrapproduzione è sintetizzata in *Figura 121*.

S O V R A P R O D U Z I O N E	P poc	P s.cap	Priorità carica	SOCs.cap	Tacc	Ppdc-Ppoc	P pdc	R acc
	<-9kW	-9kW	Elettrico		$\geq T_{pdc,max}$		OFF	.+1
					<T pdc,max	< P pdc, mant	P pdc, mant	.-1
						$\geq P_{pdc, mant}, < P_{pdc,max}$	Ppdc-Ppoc	.-1
			Termico	$\geq SOC_{max}$	$\geq P_{pdc,max}$	$\geq P_{pdc,max}$	P pdc,max	.+1
					$\geq T_{pdc,max}$		OFF	.+1
					<T pdc,max	< P pdc, mant	P pdc, mant	.-1
						$\geq P_{pdc, mant}, < P_{pdc,max}$	Ppdc-Ppoc	.-1
				<SOCmax	$\geq P_{pdc,max}$	$\geq P_{pdc,max}$	P pdc,max	.+1
					$\geq T_{pdc,max}$		OFF	.+1
					<T pdc,max	< P pdc, mant	P pdc, mant	.-1
						$\geq P_{pdc, mant}, < P_{pdc,max}$	Ppdc-Ppoc	.-1
>-9kW, <0	P poc		Elettrico	$\geq SOC_{max}$	$\geq T_{pdc,max}$		OFF	.+1
					<T pdc,max	< P pdc, mant	P pdc, mant	.-1
						$\geq P_{pdc, mant}, < P_{pdc,max}$	P pdc-P poc	.-1
			Termico	$\geq SOC_{max}$	$\geq P_{pdc,max}$	$\geq P_{pdc,max}$	P pdc,max	.+1
					$\geq T_{pdc,max}$		OFF	.+1
					<T pdc,max	< P pdc, mant	P pdc, mant	.-1
						$\geq P_{pdc, mant}, < P_{pdc,max}$	P pdc-P poc	.-1
				<SOCmax	$\geq P_{pdc,max}$	$\geq P_{pdc,max}$	P pdc,max	.+1
					$\geq T_{pdc,max}$		OFF	.+1
					<T pdc,max	< P pdc, mant	P pdc, mant	.-1
						$\geq P_{pdc, mant}, < P_{pdc,max}$	P pdc-P poc	.-1
					$\geq P_{pdc,max}$	$\geq P_{pdc,max}$	P pdc,max	.+1
					$\geq T_{pdc,max}$		OFF	.+1
					<T pdc,max	< P pdc, mant	P pdc, mant	.-1
						$\geq P_{pdc, mant}, < P_{pdc,max}$	P pdc-P poc	.-1

Figura 121 Truth table loghice di automazione- sovrapproduzione

Nel caso di sovracconsumo, ovvero con potenza positiva al POC, l'algoritmo adotta una strategia opposta, mirata a ridurre il più possibile il prelievo dalla rete. Anche in questo caso si verifica per prima cosa il rispetto del limite di potenza di scarica dei supercapacitori, seguito dal controllo della priorità e dello stato di carica. Si analizzano poi le temperature degli accumuli e la potenza necessaria a portare il POC a zero. La pompa di calore viene disattivata se il valore calcolato è negativo, così da ricadere nella condizione di sovrapproduzione al ciclo successivo. In caso contrario, se gli accumuli sono scarichi o se la potenza necessaria a bilanciare il POC è maggiore del valore minimo di mantenimento, la potenza viene fissata a quest'ultimo per garantire la continuità del servizio termico. Solo se la potenza necessaria a bilanciare la rete è positiva ma inferiore al valore di mantenimento, questa viene direttamente assegnata alla pompa di calore. In [Figura 122](#) si riportano le logiche dell'automazione nel dettaglio.

S O V R A C O N S U M O	P poc	P s.cap	Priorità scarica	SOCs.cap	Tacc	Ppdc-Ppoc	P pdc	R acc
	>0, <9kW	P poc	Elettrico	$\leq SOC_{min}$	$\leq T_{min}$		P pdc, mant	.-1
					>T min	> P pdc, mant	P pdc, mant	
						$\geq 0, \leq P_{pdc, mant}$	Ppdc-Ppoc	
			Termico	>SOCmin	≥ 0	< 0	OFF	
					$\leq T_{min}$		P pdc, mant	
					>T min	> P pdc, mant	P pdc, mant	
						$\geq 0, \leq P_{pdc, mant}$	Ppdc-Ppoc	
					≥ 0	< 0	OFF	
	>9kW	9 kW			$\leq T_{min}$		P pdc, mant	
					>T min	> P pdc, mant	P pdc, mant	
						$\geq 0, \leq P_{pdc, mant}$	Ppdc-Ppoc	
					≥ 0	< 0	OFF	

Figura 122 Truth table loghice di automazione- sovracconsumo

Infine, la piattaforma espone un'interfaccia grafica per la gestione delle prove (riportata in *Figura 123*) dove, oltre al nome da assegnare alle prove, è possibile impostare:

The screenshot displays a web interface for managing experiments, organized into several sections:

- PARAMETRI PRINCIPALI**
 - NOME ESPERIMENTO:** A text input field.
 - DATA E ORA INIZIO ESPERIMENTO:** A date and time picker showing 'dd/mm/yyyy --:--'.
 - FREQUENZA DI ESECUZIONE AUTOMAZIONE:** A text input field with the unit 'secondi' below it.
- PARAMETRI DEI PROFILI DI CARICO**
 - Three buttons: 'Upload CSV DryCooler ACS', 'Upload CSV DryCooler ACC', and 'Upload CSV Carico Elettronico'.
- IMPOSTAZIONI PER L'ESPERIMENTO**
 - Fonte Energetica:** Radio buttons for 'PV' (checked) and 'PVT'.
 - Priorità di Carica:** Radio buttons for 'TERMICO' (checked) and 'ELETTRICO'.
 - Priorità di Scarica:** Radio buttons for 'TERMICO' (checked) and 'ELETTRICO'.
 - % ESCLUSIVA TAMPONE:** A text input field.
 - Tmin StorageACC:** A text input field with a '°C' label.
- PROFILO CONCORDATO**
 - 'Upload CSV Profilo POC' button.
 - 'Generate JSON' button.

Figura 123 Pagina di gestione degli esperimenti

- Data e ora di inizio delle prove
- Frequenza di esecuzione dell'automazione
- Fonte energetica da considerare nelle automazioni
- Priorità di carica e scarica (se storage termici o supercapacitori)
- Percentuali di utilizzo da storage dei supercap (il resto viene utilizzato come tampone per sopperire all'elevata inerzia degli altri sistemi coinvolti)
- Temperatura minima ammissibile per gli storage termici
- Un eventuale profilo di carico da seguire al POC in ottica demand side management

4.2.3 Classificazione

Nella pratica professionale e nell'immaginario di tanti professionisti del settore il concetto di Digital Twin è spesso associato unicamente alla mera rappresentazione 3D di una struttura, trascurando la natura dinamica dei dati ad esso collegati e confondendolo con il risultato finale della procedura di progettazione BIM, ossia un semplice modello digitale 3D. In altri casi, invece, viene considerato esclusivamente in riferimento alle funzioni di simulazione, imponendo quindi un livello funzionale di base estremamente elevato.

Nel primo caso, quindi, non vengono colte a pieno le potenzialità di una tecnologia che potrebbe in potenza rivoluzionare il mondo della gestione degli edifici e delle infrastrutture, mentre nel secondo si generano aspettative eccessivamente elevate, non sempre soddisfatte dai gemelli digitali.

Prendendo come riferimento la norma ISO 23247 [48], che tratta specificatamente il tema del Digital Twin, la definizione proposta resta molto generica. Il Digital Twin viene descritto come:

“una rappresentazione digitale di un elemento manifatturiero osservabile con sincronizzazione tra l'elemento e la sua rappresentazione digitale”

Il concetto di tridimensionalità non viene preso minimamente in considerazione, il che consente di attribuire il nome di Digital Twin a rappresentazioni bidimensionali o addirittura a schemi monodimensionali. Anche dal punto di vista funzionale la norma stabilisce ben poco, soffermandosi più sugli aspetti relativi alla gestione dei dati e delle informazioni e all'architettura tecnico-informatica generale di un Digital Twin, senza specificare i livelli prestazionali minimi o comunque raggiungibili da tale tecnologia.

Inoltre, quando il Digital Twin viene applicato nel settore dell'edilizia, raramente ci si trova di fronte a situazioni in cui tutti i settori impiantistici siano coperti dagli stessi livelli funzionali, anzi, spesso ci si concentra su singoli aspetti dell'infrastruttura. Ad esempio, un Digital Twin di una cabina elettrica, commissionato dal reparto manutenzione elettrica dell'impianto, si concentrerà sugli aspetti legati appunto al sistema elettrico (livelli di tensioni, flussi di corrente, stato degli organi di manovra e protezioni, trasformatori) e, al più, alle variabili ambientali della cabina (come temperatura e umidità) che più impattano tale sistema, senza, ovviamente, prendere in considerazione in alcun modo ad esempio gli aspetti legati alla resistenza strutturale dell'edificio che ospita la cabina.

Queste considerazioni palesano un'attuale mancanza oggettiva di classificazione di questa tecnologia, con conseguente confusione sia nel commissionare eventuali Digital Twin, sia nel valutarlo economicamente, ma anche nel confronto di diversi modelli.

Confrontando le due tecnologie cardine della digitalizzazione in ambito edilizio, BIM e Digital Twin, si nota come per la prima di esse siano presenti diverse possibilità di classificazione che permettono di valutare sotto vari aspetti i livelli funzionali e prestazionali del risultato digitale finale.

Una prima classificazione del BIM è quella basata sui “**livelli di informazione**”. Agli attuali modelli BIM possono essere attribuite fino a 7 dimensioni standardizzate più altre tre di nuova concezione.

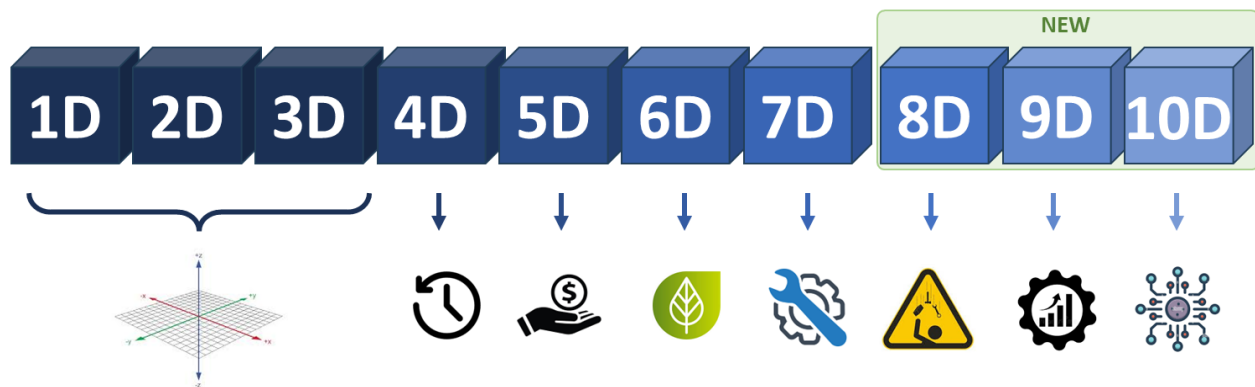


Figura 124 Le dieci dimensioni del BIM

Ad ogni progettazione in ambiente BIM viene attribuito un livello di informazione in base a quali aspetti vengono presi in considerazione durante le fasi di progettazione e realizzazione dell'opera. Analizziamo nel dettaglio, le 10 dimensioni attribuibili a una progettazione in BIM:

- **3D**: le prime 3 dimensioni sono banalmente relative al **dominio spaziale**, quindi allo sviluppo del progetto lungo gli assi x, y e z.
- **4D**: La prima dimensione che si aggiunge alle tre spaziali è il **tempo**. Una progettazione BIM in 4D consente di visualizzare, gestire e pianificare la programmazione temporale e la sequenza delle attività di cantiere e l'avanzamento dei lavori.
- **5D**: Dopo le dimensioni fisiche, la successiva è ovviamente quella relativa agli **aspetti economici**. Permette un'elaborazione dinamica del computo metrico associato all'opera, associando ad ogni elemento un costo unitario. In questo modo è possibile valutare come eventuali modifiche progettuali impattino sui costi totali, effettuare analisi di budget e in generale valutare la sostenibilità economica del progetto.

- **6D (7D nella UNI 11337):** la sesta dimensione incorpora nel modello BIM i dati relativi alla **sostenibilità energetica ed ambientale**. Consente di valutare il comportamento energetico dell'opera e ottimizzare l'impatto ambientale durante l'intero ciclo di vita dell'edificio (Life Cycle Assessment) potendo confrontare differenti soluzioni impiantistiche e architettoniche durante la fase di progettazione.
- **7D (6D nella UNI 11337):** la settima dimensione, invece, si concentra sulla **gestione** e sulla **manutenzione** dell'opera una volta conclusa la sua realizzazione. Include informazioni su materiali, componenti impiantistici, manuali d'uso, piani di manutenzione, schede tecniche e ricambi. Questo consente l'integrazione con software di Facility Management per supportare la gestione efficiente dell'edificio durante il suo intero ciclo di vita.

Le 3 nuove dimensioni sono:

- **8D:** l'ottava dimensione è quella relativa alla sicurezza sia in fase di cantiere che di esercizio. Consente di simulare scenari di rischio, pianificare misure di sicurezza sul cantiere (DVR, POS), individuare interferenze pericolose e prevedere la presenza di dispositivi di protezione collettiva. È uno strumento utile per redigere la documentazione necessaria in materia di sicurezza nei cantieri.
- **9D:** la numero nove, incentrata sull'efficienza del progetto stesso, con l'obiettivo di ridurre al minimo i ritardi ed evitare lo spreco di risorse. Mira ad ottimizzare e snellire tutti gli step necessari alla realizzazione di un'opera.
- **10D:** e infine l'ultima, relativa alla digitalizzazione e all'industrializzazione dell'intero processo edilizio. Riflette l'ambizione di industrializzare i flussi di lavoro nel settore delle costruzioni e di aumentare la produttività. Può essere vista come l'obiettivo comune delle dimensioni precedenti.

Un'altra possibile classificazione associata al mondo del BIM è quella basata sul "livello di sviluppo" del progetto. Il LOD rappresenta il grado di affidabilità, completezza e maturità degli elementi all'interno del modello BIM in una data fase del processo progettuale, costruttivo o gestionale. Esistono differenti standard internazionali per definire il livello di sviluppo. La classificazione statunitense identifica 6 livelli, rappresentati da un valore numerico crescente col livello di sviluppo stesso, partendo da 100 fino a 500. In Italia la classificazione è simile, identifica tuttavia 7 livelli numerati con le lettere alfabetiche in ordine progressivo, fornendo una classificazione leggermente più accurata.



Figura 125 Level of detail del BIM

Prendendo come riferimento la classificazione statunitense, i livelli sono i seguenti:

- **LOD 100 (Concettuale):** rappresenta lo stadio iniziale del progetto, con elementi generici e informazioni puramente indicative. Viene utilizzato per analisi di fattibilità e stime dei costi.
- **LOD 200 (Schematico):** introduce una definizione geometrica approssimativa degli elementi, sufficiente per la pianificazione iniziale e la valutazione degli spazi, utile in fase di progettazione preliminare o per stime di massima.
- **LOD 300 (Dettagliato):** aumenta il livello di dettaglio degli elementi, con geometrie precise e attributi funzionali associati. È tipico della fase di progettazione esecutiva e permette di elaborare computi metrici affidabili.
- **LOD 350 (Documentazione costruttiva):** include informazioni dettagliate per la costruzione, come dimensioni precise, connessioni materiali e interazioni tra i sistemi. Viene utilizzato per coordinamento multidisciplinare, clash detection e progettazione costruttiva.
- **LOD 400 (Fabbricazione e Assemblaggio):** fornisce dati specifici per la produzione e l'assemblaggio di componenti prefabbricati.
- **LOD 500 (As-Built):** rappresenta il modello finale e aggiornato con le informazioni relative all'edificio realizzato. Viene utilizzato per la gestione, la manutenzione e la dismissione dell'infrastruttura.

Sostandoci nel dominio del Digita Twin, l'unica classificazione ampiamente riconosciuta presente in letteratura è quella basata sui flussi di dati. Essa identifica tre diversi tipi di entità digitali:

- **Digital model.** È una rappresentazione digitale statica di un oggetto fisico e qualsiasi cambiamento nel mondo reale non ha alcun impatto sul modello. Mancando completamente di sincronizzazione, non può essere considerato un Digital Twin.
- **Digital Shadow.** In questo caso si ha una sincronizzazione tra modello digitale e oggetto fisico, ma la comunicazione è unidirezionale: dall'oggetto fisico a quello digitale. Ciò consente aggiornamenti in tempo reale e una rappresentazione accurata sullo stato attuale dell'asset fisico. Tuttavia, dal modello digitale non si può operare in alcun modo sul mondo fisico.
- **Digital Twin.** In questo caso la sincronizzazione è completa e il flusso di dati ha un carattere bidirezionale. Il modello digitale non solo riflette lo stato attuale dell'oggetto fisico, ma può anche agire su di esso. Questa interazione può avvenire attraverso comandi manuali, trasformandolo in un'interfaccia utente avanzata, oppure in modo automatico, sfruttando algoritmi automatici di controllo.

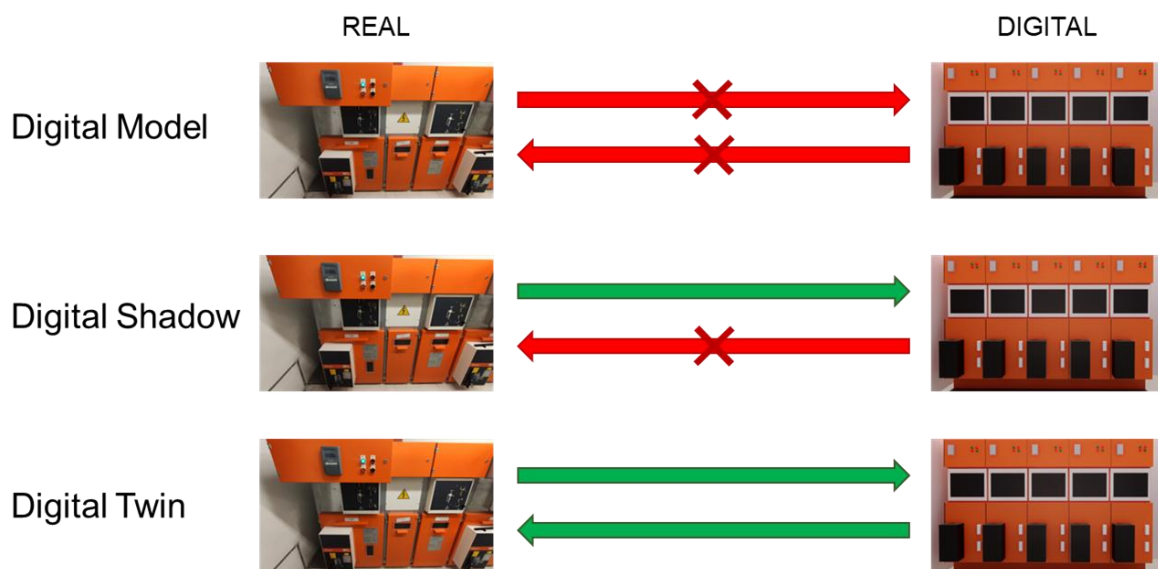


Figura 126 Digital model, digital shadow e digital twin

Nella pratica e seguendo la definizione fornita dalla norma ISO 23247, anche il Digital Shadow va considerato come un Digital Twin, soprattutto quando offre un elevato grado di monitoraggio e dettaglio in tempo reale. Tuttavia, la presenza di una comunicazione bidirezionale è ciò che rende possibili funzionalità più avanzate, come l'automazione e il controllo attivo, che sono spesso considerate le caratteristiche chiave di un Digital Twin completamente sviluppato.

Come anticipato a inizio capitolo, questa classificazione, per quanto utile, risulta insufficiente a cogliere a pieno la complessità di un Gemello Digitale, soprattutto nel contesto AEC (Architecture, Engineering Construction).

Nel mettere in luce questa esigenza è stata ipotizzata una possibile soluzione volta a colmare tale lacuna, proponendo una classificazione che possa essere di facile lettura, comprensione e applicazione, e allo stesso tempo adeguata alla caratterizzazione di un Digital Twin in applicazioni edilizie e infrastrutturali.

Il concetto alla base del nuovo sistema introdotto è quello di elaborare una stringa minimalista che sia in grado di descrivere completamente le caratteristiche funzionali del Digital Twin in relazione ai singoli sistemi tecnici, e che lo caratterizzi a livello dimensionale. La struttura di base proposta è definita nell'espressione seguente:

DT-  **:**  **:**  **:**  **:**  **:**  **:**

Figura 127 Struttura della stringa di classificazione proposta

Ad eccezione delle prime due lettere che rappresentano semplicemente il termine Digital Twin (“DT”), applicando la classificazione a casi reali i simboli *u,v,w,x,y* e *z* verranno sostituiti da numeri che caratterizzano il livello di complessità nella rappresentazione e nell'interazione con l'edificio per ogni sistema tecnico [51].

Il primo numero, affiancato alla lettera “d”, definisce il numero di dimensioni spaziali associate al modello. Infatti, per quanto è comune nell’immaginario collettivo considerare Digital Twin esclusivamente modelli 3D (e, a parere dello scrivente, così dovrebbe essere per non creare ambiguità con dei semplici sistemi SCADA), seguendo fedelmente la normativa questi possono essere anche bidimensionali o monodimensionali. La differenza in termini di ore necessarie al suo sviluppo, di possibili applicazioni e di funzionalità è notevole ed è stato quindi necessario inserire tale specifica all’interno della stringa di

classificazione. In **Figura 130**, Figura 128, Figura 129 si riportano degli esempi di digital twin 1D, 2D e 3D del laboratorio LAMBDA presso il DIAEE dell'università La Sapienza di Roma:

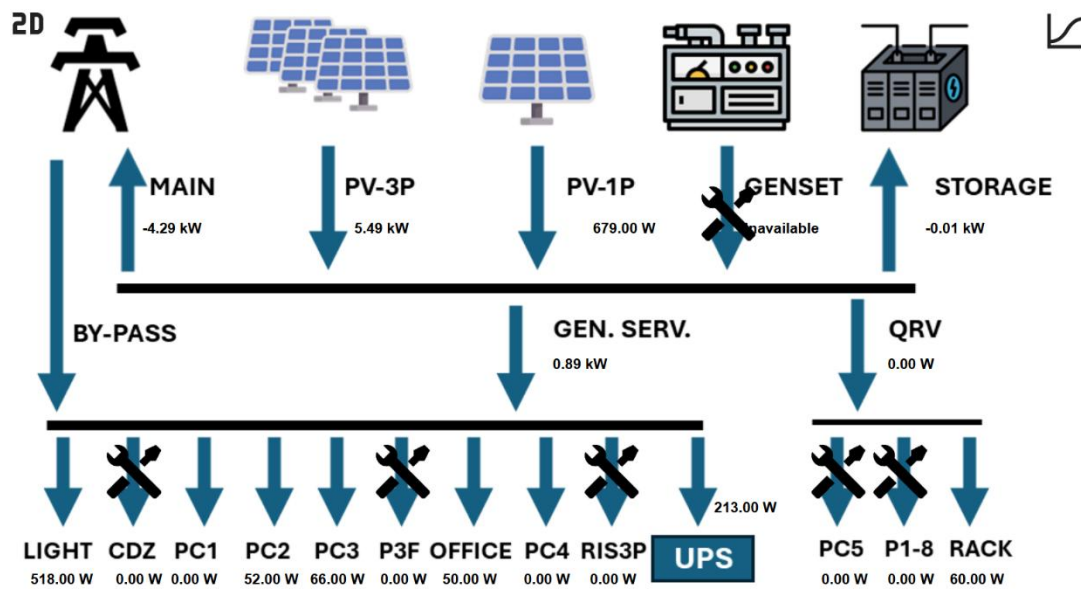


Figura 130 Esempio di digital twin 1D – dal laboratorio LAMBDA



Figura 128 Esempio di digital twin 2D – dal laboratorio LAMBDA



Figura 129 Esempio di digital twin 3D – dal laboratorio LAMBDA

Di conseguenza, la “d” che rappresenta le dimensioni del Digital Twin può avere tre valori diversi:

1. Gemello digitale unidimensionale (1D) (es: DT-d:1.M:v.E:w.P:x.S:y.X:z);
2. Gemello digitale bidimensionale (2D) (es: DT- d:2.M:v.E:w.P:x.S:y.X:z);
3. Gemello digitale tridimensionale (3D) (es :DT- d:3.M:v.E:w.P:x.S:y.X:z).

Le lettere successive rappresentano invece i sistemi tecnici all'interno dell'edificio. Le prime tre sono le ben note classi M E P già esistenti, che rappresentano tutti i componenti e gli impianti appartenenti alle categorie Meccanica, Elettrica e Idraulica. Poiché in questo caso non viene presa in considerazione la classe IoT (in quanto considerata a servizio dei sistemi tecnici) è necessario introdurre delle precisazioni sulla definizione di queste classi per poter adattare perfettamente qualsiasi componente del Digital Twin a una di esse e mantenere la coerenza nelle classificazioni successive. Alle tre M E P ne sono state aggiunte altre due, “*Structural*” e “*Safety and Security*”, cercando di coprire tutti gli elementi che possono comporre un modello.

Le linee guida proposte per definire l'appartenenza alle diverse classi sono le seguenti:

- **M (Mechanical):** la classe dei sistemi meccanici rappresenta tutti i sistemi e i componenti utilizzati per la termoregolazione, la ventilazione e il controllo della qualità dell'aria (HVAC, heating, ventilation and air conditioning).
Vanno quindi considerati appartenenti a questa classe i dispositivi di generazione di calore e/o freddo come centrali frigorifere, centrali termiche, pompe di calore, per la distribuzione di fluidi ai fini della termoregolazione (tubazioni, valvole, serrande, pompe, ventilatori), dispositivi di emissione terminali come UTA, ventilconvettori, condizionatori, radiatori, pavimenti radianti ecc. ma anche tutti i sistemi di sensoristica e attuazione associati a questi sistemi (sensori di parametri ambientali, elettrovalvole, attuatori per pompe, ventilatori e serrande, sensori di temperatura, flusso, entalpia di fluidi termovettori ecc.
- **E (Electrical):** La classe elettrica comprende tutti i dispositivi utilizzati per la distribuzione dell'energia elettrica, come gli interruttori di sicurezza, sezionatori, cavi, giunti, quadri elettrici in generale ecc. Sono da considerarsi parte dell'impianto elettrico anche gli attuatori IoT come quelli per applicazioni nel campo dell'illuminazione, della gestione degli oscuranti o nel controllo dei carichi, ma anche sensori che misurano le grandezze elettriche e i dispositivi

per l'implementazione della gestione dell'energia e dell'analisi dei flussi di potenza.

- **P (Plumbing):** La classe idraulica comprende le tubazioni, valvolame, scarichi e in generale elementi idraulici utilizzati per trasferire l'acqua all'interno o all'esterno dell'edificio. Fanno parte di questa categoria i sistemi di gestione dell'acqua potabile, dell'acqua calda sanitaria, delle acque chiare, grigie e scure, e dello smaltimento dell'acqua piovana. Una tubazione potrà quindi essere inclusa nella classe plumbing o mechanical a secondo del suo sistema di appartenenza.
- **S (Structural):** in questa classe sono stati inseriti tutti gli elementi architettonici e strutturali dell'edificio, a partire dalla muratura, comprendendo anche travi, tramezzi, soffitti, coperture mobili ecc. Faranno parte di questa classe anche tutti gli attuatori e i sensori a servizio di questi elementi, come ad esempio sensori di vibrazioni, accelerometri, dispositivi per il monitoraggio della deriva di una struttura o attuatori per coperture mobili.
- **X (Safety and Security):** per non essere confusa con la "S", per rappresentare i sistemi relativi agli impianti speciali è stata scelta la lettera "X", in particolare in riferimento alla sicurezza della persona e all'antiintrusione. Fanno parte di questa classe tutti gli elementi e i dispositivi afferenti a sistemi antincendio, allarmi perimetrali e volumetrici, videosorveglianza controllo accessi ecc. esempi comuni di dispositivi IoT associati a questi sistemi sono i sensori di movimento e presenza, contatti magnetici per porte e finestra, IPCam, termocamere e sensori di fumo.

Ad ogni classe presente nella stringa viene quindi associato un codice rappresentativo del livello funzionale raggiunto dal digital twin per lo specifico settore. Sono state individuate tre principali funzionalità associabili ad un Digital Twin:

- **Monitoraggio:** è la funzione di base dei Digital Twin, che rende visibili in tempo reale tutti gli stati e i valori dei parametri dell'edificio. Il monitoraggio avviene attraverso l'implementazione di una rete di comunicazione in grado di trasmettere i dati da tutti i dispositivi installati nell'edificio al modello Digital Twin.
- **Controllo:** consente all'utente di inviare input e comandi ai diversi dispositivi e sistemi di campo, programmando anche azioni basate sul soddisfacimento di condizioni predeterminate. Pertanto, il controllo può essere implementato solo

quando è già presente una rete di comunicazione e quando il sistema comprende anche degli attuatori. Tale controllo può essere anche gestito autonomamente dal sistema sfruttando algoritmi e automazioni.

- **Simulazione e previsione:** le capacità di simulazione e previsione del Digital Twin possono essere utilizzate per prevedere il comportamento futuro della struttura/infrastruttura o come questa reagisca di fronte a differenti situazioni. Ad esempio può essere utile nel programmare le manutenzioni future tramite tecniche di manutenzione predittiva o stimare di produzione e consumo di energia per una gestione efficace degli accumuli elettrici o termici o per il demand side management. Per svolgere queste funzioni è necessario un database che metta in relazione tra loro diversi elementi e quantità dei sistemi tecnici e modelli matematici che rappresentino il comportamento di ogni componente interessato nella simulazione.

I codici ipotizzati per descrivere i livelli funzionali sono riassunti in *Tabella 4*:

Tabella 4 Livelli di funzionalità proposti

Levels	Functionality
0	No Functionality
1	Monitoring
2C	Monitoring + Control
2S	Monitoring + Simulation
3	Monitoring + Control + Simulation

il livello 1 è rappresentato dalla sola funzione di monitoraggio, caratteristica quindi di un Digital Shadow; il livello 2 viene suddiviso in due rami a seconda che il monitoraggio sia affiancato dalla funzione di controllo o da quella di simulazione, mentre il terzo e ultimo livello rappresenta un Digital Twin completo, con funzioni di monitoraggio, controllo e simulazione.

Quando sono presenti elementi esterni aggiuntivi che influenzano uno dei sistemi precedentemente definiti, viene aggiunto un segno “+” dopo il numero di livello del sistema interessato. Ad esempio, una porta monitorata (non inclusa nel sistema meccanico “M”), essendo aperta o chiusa, può influenzare fortemente il controllo e la gestione del sistema HVAC. Di conseguenza, il segno “+” viene aggiunto dopo il livello M per rappresentare questo fattore di influenza esterno. È da notare che il segno “+” non fornisce informazioni sul tipo di elemento di influenza esterna, ma solo sulla sua presenza.

Per spiegare meglio la classificazione introdotta può risultare utile la sua applicazione ai casi studio già descritti all'interno della tesi. Partendo dal Digital Twin del laboratorio LAMBDA della Sapienza Università di Roma, analizziamo il livello di accuratezza nella rappresentazione di tutti i diversi sistemi tecnici:

- Meccanico (M): il Digital Twin copre il monitoraggio, tramite sensori di temperatura e umidità, e il controllo tramite la gestione della pompa di calore, raggiungendo il livello 2C della classificazione. Inoltre, il laboratorio LAMBDA è dotato di contatti porta e sensori di presenza coinvolti nelle logiche di funzionamento del sistema HVAC. Questo fattore di influenza esterno è rappresentato da un segno "+" aggiuntivo nella stringa di definizione.
- Elettrico (E): l'impianto elettrico del laboratorio LAMBDA è dotato di un sistema di monitoraggio completo del quadro elettrico. Inoltre, sono presenti attuatori per il controllo carichi e dell'illuminazione, classificando il sistema al livello 2C. anche in questo caso è necessario aggiungere un segno "+" per considerare i rilevatori di presenza utilizzati per controllare l'impianto di illuminazione.
- Impianto idraulico (P): il Digital Twin creato per il laboratorio non prende in considerazione l'impianto idraulico in alcun modo e il livello associato a questo sistema tecnico è quindi 0.
- Strutturale (S): come visto per il sistema idraulico, anche il livello associato al sistema strutturale è 0.
- Sicurezza (X): l'unica caratteristica del Digital Twin relativa alla Sicurezza e alla Protezione sono le telecamere di videosorveglianza e i rilevatori di presenza, entrambi riconducibili a funzioni di monitoraggio. Il livello risultante è quindi 1.

La stringa di classificazione finale per il Digital Twin del laboratorio LAMBDA è quindi la seguente:

$$DT - d: 3.M: 2C+.E: 2C+.P: 0.S: 0.X: 1$$

La seconda applicazione della classificazione è riferita al digital twin della rete ibrida S.A.P.I.EN.T.E.

La costruzione della stringa segue la stessa analisi eseguita per il caso precedente:

- Dimensioni (d): il Digital Twin della rete S.A.P.I.EN.T.E. è tridimensionale, quindi il livello "d" è 3.

- Meccanico (M): il sistema meccanico è monitorato attraverso molteplici sensori di temperatura e stati di feedback delle valvole e delle pompe di circolazione, permettendo inoltre il controllo di quest'ultime tramite gli algoritmi di automazioni implementati nella piattaforma. L'intero impianto è inoltre pensato per la simulazione della risposta della rete a differenti situazioni, potendo ad esempio simulare profili di assorbimento termico differenti sia per il riscaldamento, per il raffrescamento e per il consumo di acqua calda sanitaria. Il digital twin implementa funzioni di monitoraggio, controllo e simulazione caratterizzando il sistema con un livello 3.
- Impianto elettrico (E): come visto in precedenza per il laboratorio LAMBDA, anche l'impianto elettrico S.A.P.I.EN.T.E. è completamente equipaggiato con sensori e attuatori in grado di monitorare e controllare il layout dell'impianto direttamente dal Digital Twin. La funzione di simulazione è coperta dalla possibilità di escludere virtualmente la produzione da fonte rinnovabile di uno o di tutti e due i sistemi fotovoltaici. Il livello raggiunto dall'impianto elettrico è 3.
- Impianto idraulico (P): la rete S.A.P.I.EN.T.E. emula l'impianto idraulico per l'acqua calda sanitaria utilizzando accumulo termico e valvole per reindirizzare il flusso d'acqua imitando il funzionamento reale di un edificio. Include anche sensori di pressione e misuratori di portata ed entalpia portando l'impianto idraulico al livello 2C.
- Strutturale (S): nessun parametro strutturale viene monitorato o controllato. Privo di qualsiasi funzionalità questo sistema è classificato al livello 0.
- Sicurezza (X): anche in questo caso non è presente alcuna funzione relativa alla sicurezza, classificando il sistema al livello 0.

I tre sistemi tecnici presi in considerazione risultano fortemente connessi tra loro lato automazione, influenzandosi a vicenda e interferendo l'uno nelle operazioni dell'altro. Per rispecchiare questa caratteristica è stato aggiunto il segno "+" a tutti e 3.

La stringa di caratterizzazione finale per il Digital Twin della rete S.A.P.I.EN.T.E. è la seguente:

$$DT - d: 3. M: 3+. E: 3+. P: 2C+. S: 0. X: 0$$

5. CONCLUSIONI

Con la presente tesi si è voluto approfondire il tema della digitalizzazione degli impianti, analizzando gli aspetti software e hardware legati al mondo dell'Internet of Things ed esplorando le nuove frontiere tecnologiche sul tema del Digital Twin. Sono stati seguiti principalmente tre rami paralleli ma tra loro interconnessi: i sistemi di monitoraggio, legati principalmente al tema dell'energia, la building automation, con focus sulle applicazioni al settore residenziale (domotica), e il Digital Twin.

Inizialmente sono stati descritti i concetti alla base della digitalizzazione degli impianti, con una descrizione dettagliata dei protocolli di comunicazione coinvolti nell'applicazione dell'IoT agli impianti tecnici e delle architetture di sistema più diffuse e utilizzate nelle differenti situazioni, senza trascurare le soluzioni disponibili a livello di dispositivi intelligenti e applicativi di supervisione e controllo.

Sono state quindi esposte le attività applicative che hanno consentito di applicare un approccio critico e pragmatico al tema affrontato. È stata presentata una metodologia di nuova introduzione, tuttora in fase di studio e perfezionamento, per la valutazione prestazionale dei sistemi di monitoraggio: il "Level of Coverage". Questo metodo è stato applicato direttamente al sistema di monitoraggio di un sito industriale consentendo così di confrontare più opzioni per la definizione dell'indicatore finale proposto. Sempre sul tema dei monitoraggi sono stati presentati due sistemi realizzati durante il percorso di dottorato: uno per il monitoraggio energetico ed elettrico della microrete del laboratorio LAMBDA; uno per il monitoraggio distribuito di utenze residenziali, finalizzato alla condivisione di dati anonimi con altri enti di ricerca. Entrambi sono stati sviluppati utilizzando software open source ospitati localmente nel server del laboratorio stesso.

Sul tema della domotica è stato proposto un confronto tra tecnologie tradizionali e di nuova generazione, descrivendo due sistemi realizzati durante il percorso di dottorato, applicati alla stessa tipologia residenziale. Dal confronto è emerso quanto le nuove proposte commerciali in ambito domotico rispecchino i traguardi raggiunti nel settore elettronico-informatico: tecnologie più economiche e alla portata di tutti, più facili da installare, grazie ad una comunicazione wireless e alle dimensioni più compatte, più facili da integrare e in grado di rispondere alle nuove esigenze (e.g. supporto ai contenuti multimediali), ma allo stesso tempo meno affidabili e meno mature.

Infine, per quanto riguarda il Digital Twin, il confronto tra soluzioni basate su modelli tridimensionali informativi (Ifc), derivati da progettazione in ambiente BIM, e modelli puramente geometrici ha messo alla luce quanto sia difficile semplificare problemi complessi. La soluzione basata su modelli *obj* non si è rivelata adattabile a contesti più articolati di quello residenziali, ma il suo studio ha permesso di individuare aree di miglioramento della più complessa soluzione basata sull'Ifc. È stata quindi proposta una soluzione che potesse soddisfare allo stesso tempo esigenze di dettaglio informativo, di integrazione agevole tra modello statico e dati dinamici, e di privacy e proprietà intellettuale dei dati. La metodologia sperimentale "*BIM ready to Digital Twin*", ideata e sviluppata nel corso del dottorato, è stata prima approfondita sotto l'aspetto teorico e poi applicata alla micro-rete S.A.P.I.EN.T.E con la realizzazione di una piattaforma open source, on promise, in grado di integrare con estrema facilità e rapidità modelli BIM e dati dinamici.

REFERENCES

- [1] W. E. Zhang et al., "The 10 Research Topics in the Internet of Things," 2020 IEEE 6th International Conference on Collaboration and Internet Computing (CIC), Atlanta, GA, USA, 2020
- [2] IEEE Internet of Things Initiative, IEEE IoT: Towards a Definition of the Internet of Things, Issue 1, May 14, 2015
- [3] S. Lee, J. Kim, D. Zhang, J. Song, e H. Jung, Problem Statement for Internet of Things, IETF Internet-Draft draft-lee-iot-problem-statement-00, Work in Progress, July 2013. [Online]. Disponibile a: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-lee-iot-problem-statement-00>
- [4] National Institute of Standards and Technology (NIST), Global City Teams Challenge (SmartAmerica Round Two), NIST, Gaithersburg, MD, USA, 2014.
- [5] J. A. Stankovic, "Research Directions for the Internet of Things," IEEE Internet of Things Journal, vol. 1, no. 1, pp. 3–9, 2014
- [6] Suat Secgin, "Seven Layers of ISO/OSI," in Evolution of Wireless Communication Ecosystems , IEEE, 2023
- [7] J. Postel, Internet Protocol, RFC 791, Internet Engineering Task Force (IETF), Sep. 1981
- [8] J. Postel, Transmission Control Protocol, RFC 793, Internet Engineering Task Force (IETF), Sep. 1981
- [9] IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std 802.11-2020, Feb. 2021
- [10] IEEE Standard for Ethernet, IEEE Std 802.3-2022, Oct. 2022
- [11] International Electrotechnical Commission, IEC 61784-2:2019 – Industrial communication networks – Profiles – Part 2: Additional fieldbus profiles for real-time networks based on ISO/IEC 8802-3, Geneva, Switzerland: IEC, 2019
- [12] Comitato Elettrotecnico Italiano, CEI EN 62386-101:2020 – Interfaccia digitale indirizzabile per illuminazione (DALI) – Parte 101: Requisiti generali – Sistema, Milano, Italy: CEI, 2020.

- [13] ISO/IEC 14543-3 (2006), Information technology – Home electronic system (HES) standards (KNX). International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission, 2006.
- [14] ISO 16484-5:2017, Building automation and control systems (BACS) – Part 5: Data communication protocol (BACnet). International Organization for Standardization, 2017.
- [15] Information technology – Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) v3.1.1. International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission, 2016
- [16] IEEE Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE Standards Association, 2015.
- [17] Bluetooth SIG, Bluetooth Core Specification, Version 5.3, Bluetooth Special Interest Group, Jul. 2021
- [18] Connectivity Standards Alliance, Matter Specification v1.2, CSA, Davis, CA, USA, Oct. 2023
- [19] A. Verma, S. Prakash, V. Srivastava, A. Kumar, and S. C. Mukhopadhyay, “Sensing, Controlling, and IoT Infrastructure in Smart Building: A Review,” IEEE Sensors Journal, vol. 19, no. 20, pp. 9036–9046, Oct. 2019
- [20] ISO 50001:2018, Energy management systems – Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization, 2018
- [21] Italia, D.Lgs. 102/2014 (4 luglio 2014) – Attuazione della Direttiva 2012/27/UE sull’efficienza energetica. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n.165, 18/07/2014
- [22] UNI CEI EN ISO 52120-1:2022, Energy performance of buildings – Contribution of building automation, controls and building management – Part 1: General framework and procedures. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2022
- [23] M. A. Hannan et al., “A review of Internet of Energy based building energy management systems: Issues and recommendations,” IEEE Access, vol. 6, pp. 38997–39014, 2018
- [24] UNI CEI EN 17267:2019, Energy measurement and monitoring plan – Design and implementation – Principles for energy data collection. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2019

- [25] Lilis G, Conus G, Asadi N, et al. Towards the next generation of intelligent building: An assessment study of current automation and future IoT based systems with a proposal for transitional design. Sustainable Cities and Society. 2017
- [26] R. Loggia, A. Flamini, A. Galasso, R. Menichelli, C. Moscatiello and L. Martirano, "Impact of Building Automation, Controls and Building Management on the Energy Performance of Buildings," 2024 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Phoenix, AZ, USA, 2024
- [27] UNI EN 15232:2012, Energy performance of buildings – Impact of Building Automation, Controls and Building Management. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2012
- [28] Direttiva 2002/91/EC, Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), Parlamento Europeo e Consiglio, 16 dic. 2002
- [29] UNI EN 15217:2007, Prestazione energetica degli edifici – Metodi di espressione delle prestazioni energetiche e di valutazione della certificazione dell’edificio. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2007
- [30] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), EN 50090-1-1:2011 – Home and Building Electronic Systems (HBES) – Part 1-1: General requirements, Brussels, Belgium: CENELEC, 2011
- [31] Home Assistant Project, Home Assistant Documentation, [Online]. Disponibile a: <https://www.home-assistant.io/docs/>. [Visitato il: 20-maggio-2025]
- [32] C. M. Eastman et al., “An Outline of the Building Description System,” Carnegie-Mellon Univ. Research Report No. 50, Sept. 1974
- [33] C. M. Eastman, “The Use of Computers Instead of Drawings in Building Design,” presented at the National Computer Conference (ACM), Mar. 1975
- [34] C. M. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, e K. Liston, BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011
- [35] ISO 16739:2013, Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. International Organization for Standardization, 2013
- [36] buildingSMART International, Industry Foundation Classes (IFC) Schema Specifications, [Online]. Disponibile a: <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/>. [Visitato il: 13-novembre-2024]

- [37] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, "Digital Twin in Industry: State-of-the-Art," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, 2019
- [38] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," IEEE Access, vol. 8, pp. 108952–108971, 2020
- [39] CEI 64-8/8-1:2016, Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale ≤ 1000 V c.a. e 1500 V c.c. – Parte 8-1: Efficienza energetica degli impianti elettrici. Comitato Elettrotecnico Italiano, 2016.
- [40] Direttiva 2012/27/UE, Efficienza energetica, Parlamento Europeo e Consiglio, 25 ott. 2012
- [41] ENEA (2017) – Linee guida per il monitoraggio a supporto delle diagnosi energetiche (settore industriale, allegato al D.Lgs. 102/2014). Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile, maggio 2017
- [42] R. Loggia, A. Flamini, A. Galasso, A. Massaccesi, G. Mancini and L. Martirano, "Distributed Monitoring System (DMS) Evaluation with Level of Coverage (LOC) Implementation," 2024 IEEE/IAS 60th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), Las Vegas, NV, USA, 2024
- [43] A. Flamini, L. Ciurluini, R. Loggia, A. Massaccesi, C. Moscatiello and L. Martirano, "A Prototype of Low-Cost Home Automation System for Energy Savings and Living Comfort," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 59, no. 4, pp. 4931-4941, July-Aug. 2023
- [44] A. Flamini, L. Ciurluini, R. Loggia, A. Massaccesi, C. Moscatiello and L. Martirano, "Designing a Home Automation System Low-Cost for Energy Savings And Living Comfort," 2022 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Detroit, MI, USA, 2022
- [45] R. Loggia and A. Flamini, "Electrical Safety Enhanced With BIM, SCADA and Digital Twin Integration: A Case Study of a MV-LV Substation," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 60, no. 2, pp. 2725-2731, March-April 2024
- [46] A. Flamini, R. Loggia, A. Massaccesi, C. Moscatiello and L. Martirano, "Building Information Modeling and Supervisory Control and Data Acquisition Integration: The Lambda Lab Digital Twin," in IEEE Industry Applications Magazine, vol. 29, no. 1, pp. 57-66, Jan.-Feb. 2023
- [47] A. Flamini, R. Loggia, A. Massaccesi, C. Moscatiello and L. Martirano, "BIM and SCADA integration: the Dynamic Digital Twin," 2022 IEEE/IAS 58th Industrial and

Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), Las Vegas, NV, USA, 2022

- [48] ISO 23247-1:2021, Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles. International Organization for Standardization, 2021
- [49] R. Loggia et al., "A Monitoring Platform Tool for Energy Communities Optimization and AI Applications," 2025 IEEE/IAS 61st Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), Montreal, QC, Canada, 2025
- [50] A. Galasso et al., "Innovative IFC classification in BIM models ready to be converted into Digital Twins," 2025 IEEE/IAS 61st Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), Montreal, QC, Canada, 2025
- [51] A. Flamini et al., "BIM and Digital Twin in Smart Electrical Power System: an Innovative Standard Classification," 2025 IEEE/IAS 61st Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), Montreal, QC, Canada, 2025