

I
- - -
U
- - -
A
- - -
V

Università IUAV di Venezia
Corso di dottorato Culture del progetto - Ciclo XXXVIII
Ambito di ricerca
PROGETTAZIONE TECNOLOGICA E AMBIENTALE

UTILIZZO DELLA METODOLOGIA BIM (BUILDING INFORMATION MODELING) E DEGLI STANDARD OPENBIM PER LE ANALISI E IL MONITORAGGIO DELLE PRESTAZIONI TERMICHE DI EDIFICI STORICI

Dottorando: Luca Fontanella

Responsabile scientifico: prof. Fabio Peron

Supervisore: prof. Massimiliano Scarpa

Co-supervisori: Paolo Borin, Tiziano Dalla Mora

*Un uomo che vive di ricordi, diventa vecchio.
Uno che vive di progetti, resta giovane.*
Bruno Munari

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto esprimere la mia più sincera e profonda gratitudine al Prof. Massimiliano Scarpa, supervisore di questa tesi, per la straordinaria disponibilità, la costante presenza e l'attenzione con cui ha seguito ogni fase del lavoro. La sua capacità di ascoltare, di incoraggiare e di offrire sempre un confronto costruttivo ha rappresentato un punto di riferimento fondamentale durante tutti gli anni del dottorato. Senza il suo supporto, la sua pazienza e la sua fiducia, questa tesi non sarebbe stata la stessa.

Desidero inoltre ringraziare il Prof. Fabio Peron, responsabile scientifico dell'ambito di ricerca nel quale si colloca il presente lavoro, per la fiducia accordatami e per avermi dato la possibilità di sviluppare una ricerca su temi per me particolarmente significativi.

Un ringraziamento speciale va al Prof. Paolo Borin, che mi ha accompagnato lungo tutto il lavoro relativo ai temi dell'openBIM, degli standard e dell'interoperabilità. I suoi suggerimenti, la sua competenza e il continuo confronto sono stati fondamentali per dare solidità e profondità a questa parte della ricerca.

Desidero inoltre ringraziare Marco Molinari per il supporto durante il periodo trascorso a Stoccolma, per la disponibilità e l'assistenza, anche al di fuori degli aspetti strettamente legati alla ricerca. Il suo aiuto è stato fondamentale, in particolare, per lo sviluppo del caso studio relativo al KTH Live-In Lab.

Un sincero grazie va anche al personale della segreteria della Scuola di Dottorato, per la disponibilità, la puntualità e l'efficienza con cui ha sempre saputo offrire supporto in ogni momento.

Ringrazio inoltre tutti coloro che, nel corso di questi anni, hanno avuto la pazienza di ascoltarmi parlare di IFC, HBIM, sensori, database, script Python, Blender e modelli digitali, anche quando probabilmente avrebbero preferito parlare d'altro.

Il ringraziamento più grande va però a Elena, Eleonora e ai miei genitori, per il sostegno, la comprensione e la vicinanza dimostrati durante questi anni.

Questa tesi è il risultato di anni di studio, di tentativi, di errori, di notti passate davanti a un computer e di momenti in cui sembrava impossibile arrivare alla fine. Se oggi queste pagine esistono, è grazie a tutte le persone che, in modi diversi, mi sono state accanto lungo il cammino. A loro va il mio grazie più sincero.

Abstract

La ricerca ha lo scopo di approfondire i temi legati alle metodologie BIM (Building Information Modeling) e HBIM, ovvero l'applicazione del BIM al patrimonio storico, per il monitoraggio delle prestazioni termiche degli edifici storici, attraverso l'impiego di sensori IoT (Internet of Things) e l'integrazione di dati dinamici all'interno del modello informativo.

L'obiettivo è valutare come un approccio basato su standard openBIM e strumenti open source possa supportare processi di analisi, visualizzazione e supporto alle decisioni in ambito conservativo e gestionale.

Il lavoro analizza l'interoperabilità tra i principali standard dell'ecosistema BIM/openBIM e il loro utilizzo in attività operative quali le analisi termiche, il monitoraggio continuo dei dati e il Facility Management, con particolare attenzione all'estensione dell'uso del BIM lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio, dalla manutenzione alla verifica prestazionale, sia nel caso di nuove costruzioni sia nel patrimonio storico.

Nell'ambito delle attività manutentive, la ricerca propone lo sviluppo di un ambiente di lavoro online che consente a conservatori e manutentori di segnalare criticità riscontrate negli edifici, attribuire livelli di priorità e supportare una pianificazione più efficace e tempestiva degli interventi. Al fine di confrontare i dati misurati con la percezione reale degli utenti, tale ambiente è integrato con un'applicazione web dedicata alla raccolta del comfort termico percepito.

Per quanto riguarda la definizione degli interventi risolutivi delle problematiche rilevate, in relazione ai vincoli presenti nell'edificio oggetto di analisi, il lavoro esplora l'utilizzo del modello informativo come supporto alla rappresentazione delle limitazioni, orientando le scelte progettuali e manutentive in modo coerente con le esigenze di conservazione.

La scalabilità e la flessibilità del flusso di lavoro proposto sono verificate attraverso l'applicazione a casi studio eterogenei, comprendenti sia edifici di nuova realizzazione altamente monitorati che edifici storici, dimostrando il potenziale dell'approccio openBIM/IoT come strumento di supporto alla gestione e alla conservazione del costruito.

Sommario

1	Introduzione	1
1.1	Inquadramento della ricerca	3
1.2	Obiettivi	5
1.3	Contesto tecnologico	5
1.3.1	BIM: Building Information Modeling.....	5
1.3.1.1	Storia dell'evoluzione del BIM	6
1.3.2	Il BIM tra presente e futuro	10
1.3.3	HBIM: Heritage Building Information Modeling	11
1.3.4	Standard openBIM	15
1.3.4.1	IFC.....	16
1.3.4.2	IDS.....	21
1.3.4.3	bSDD.....	22
1.3.5	Internet of Things.....	26
1.3.6	Digital Twin.....	29
1.3.7	Piattaforme per la visualizzazione dello stream di dati	35
1.3.7.1	Arduino Cloud IoT.....	35
1.3.7.2	Microsoft Azure – Power BI.....	37
1.3.7.3	Autodesk Tandem	39
1.3.7.4	ACCA Software – usBIM.IoT	40
1.3.8	Alternative alle piattaforme di visualizzazione dello stream di dati.....	41
1.3.8.1	Autodesk Revit - Dynamo.....	41
1.3.8.2	Blender-Bonsai	43
1.3.9	Gestione degli edifici: Facility Management.....	45
1.3.9.1	Facility Management del patrimonio storico.....	45
1.3.9.2	Principali software per il Facility Management	46
1.3.10	Principali piattaforme IoT.....	51
1.4	Review bibliografica.....	55
2	Metodologia della ricerca.....	69
2.1	Analisi termiche negli edifici storici	69
2.1.1	Condizioni microclimatiche per la conservazione del patrimonio artistico-culturale	71
2.1.2	Calcolo del comfort percepito.....	72
2.2	Normative e leggi.....	75
2.2.1	Normative e leggi in ambito BIM	77
2.2.2	Normative e leggi nell'ambito della conservazione del patrimonio artistico-culturale	82
2.2.3	Normative e leggi nell'ambito energetico.....	85
2.2.4	Requisiti Minimi degli edifici	88
2.2.5	Criteri Ambientali Minimi - CAM.....	90
2.3	Casi studio.....	96
2.3.1	C.S. 1: Edificio residenziale convenzionale.....	96

2.3.2	C.S. 2: KTH Live-In Lab	96
2.3.3	C.S. 3: Gallerie dell'Accademia di Venezia	98
3	Risultati	101
3.1	Finalità applicative	101
3.1.1	Modellazione BIM/HBIM.....	103
3.1.2	Standard openBIM	106
3.1.3	Streaming e visualizzazione dati	115
3.1.3.1	Streaming di dati tramite software proprietari	117
3.1.3.2	Streaming di dati tramite software open source	120
3.1.4	Facility Management.....	123
3.1.4.1	Segnalazione guasti	123
3.1.4.2	Feedback utenti.....	125
3.1.4.3	Interventi sul patrimonio storico	126
3.2	Implementazione nei casi studio	131
3.2.1	Analisi termiche.....	131
3.2.2	Streaming dati IoT	137
3.2.3	Visualizzazione dati da database.....	144
3.2.4	Facility Management.....	150
3.2.4.1	Monitoraggio condizioni microclimatiche	151
3.2.4.2	Segnalazione guasti	154
3.2.4.3	Feedback utenti.....	155
3.2.4.4	Analisi di fattibilità e compatibilità degli interventi	157
4	Discussione dei risultati.....	167
4.1	Differenze concettuali e operative tra BIM e HBIM	168
4.2	Limiti dell'attuale modellazione informativa nel contesto HBIM	170
4.3	Analisi critica dell'approccio proposto in relazione ai casi studio.....	171
5	Conclusioni e sviluppi futuri	175
	Sigle e abbreviazioni.....	179
	Bibliografia e sitografia.....	181
	Indice delle figure	193
	Indice delle tabelle	196

1 INTRODUZIONE

L'utilizzo del Building Information Modeling (BIM) in ambito edilizio è in continua espansione. Questa crescita costante è testimoniata sia dai report basati su indagini di mercato, come lo studio condotto da Natspec nel 2023 [1], sia dall'aumento costante delle pubblicazioni scientifiche (fonte: Scopus. Query: "bim OR (building information modeling)"), in particolare a partire dall'anno 2002 (Fig. 1.1).

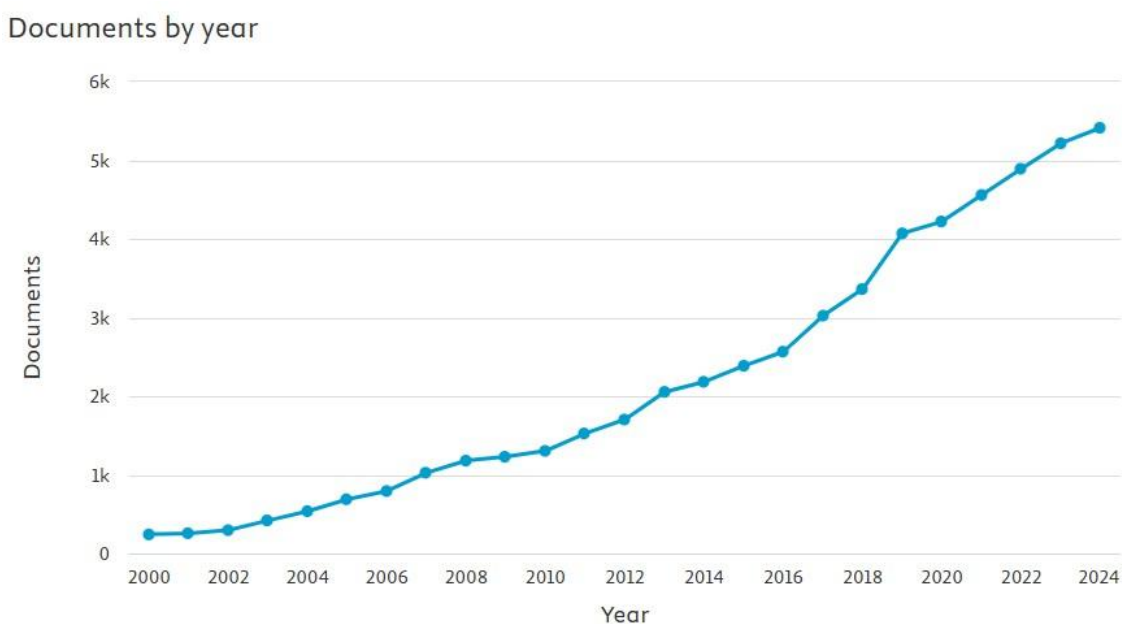


Fig. 1.1: Pubblicazioni scientifiche incentrate sulla metodologia BIM (fonte: Scopus)

Nonostante il concetto di informazioni non visive associate a modelli tridimensionali sia stato introdotto negli anni Settanta da Charles Eastman [2], è solo a partire dai primi anni Duemila, grazie alla sua progressiva adozione in ambito professionale, che questa metodologia ha iniziato a essere utilizzata in modo più sistematico [3].

Oltre ai vantaggi operativi rispetto alla progettazione tradizionale (a partire dal concetto di modellazione parametrica che ottimizza i processi di stesura degli elaborati, passando per le attività di Clash Detection, ovvero la verifica delle interferenze tra gli elementi del modello, fino all'utilizzo di ambienti di lavoro condivisi basati su cloud, i cosiddetti Common Data Environment - CDE), la diffusione di questa metodologia è stata ulteriormente incentivata anche da aspetti normativi.

Diversi paesi, infatti, ne stanno introducendo l'obbligatorietà per i lavori pubblici: la Danimarca, la Norvegia e la Finlandia, ad esempio, utilizzano il BIM dal 2014, il Regno Unito dal 2016, l'Italia dal 2018 e la Germania dal 2020 [4].

Il BIM non deve tuttavia essere interpretato come un mero obbligo normativo, ma piuttosto come l'opportunità di migliorare la qualità della progettazione e gestione degli edifici. Come verrà maggiormente descritto nel paragrafo 1.3.1, esso consente di ottimizzare l'interoperabilità tra le varie discipline, riducendo la perdita di dati durante lo scambio delle

informazioni e garantendo una collaborazione costante sin dalle fasi iniziali della progettazione o riqualificazione di un'opera, indipendentemente dalla sua tipologia.

Al fine di rendere più efficiente l'intero processo, il quadro normativo concorre a standardizzare i processi BIM. La norma ISO 19650, le cui prime parti sono state pubblicate nel 2019, costituisce oggi la norma primaria per tutte le altre anche già esistenti, ed è quindi ritenuta quella di riferimento. Essa fornisce un framework per la gestione delle informazioni applicabile all'intero ciclo di vita dell'opera che va dalle fasi di progettazione e produzione dei beni immobili (parte 1 della normativa, [5]) a quelle di consegna e gestione dei cespiti immobili (parti 2 [6] e 3 [7]). La norma fornisce inoltre indicazioni su processi e criteri dettagliati per le decisioni nelle fasi di scambio di informazioni all'interno dell'Information Management (parte 4 [8]) e stabilisce principi e requisiti per una sicura gestione delle informazioni (parte 5 [9]).

Tali normative consentono di schematizzare il grado di approfondimento e requisiti richiesti all'interno dei modelli, anche grazie all'introduzione del concetto di dimensioni BIM.

Le dimensioni BIM, introdotte con la norma italiana UNI 11337 (parte 1 [10]), permettono di definire il tipo di informazioni da associare al modello, al fine di condividere un maggiore livello di comprensione di un progetto evitando il sovraffollamento di informazioni non necessarie. Esse sono articolate come segue:

- 3D, modellazione tridimensionale per rappresentare con precisione forme, volumi e spazi;
- 4D, gestione della programmazione, con un focus sull'analisi e ottimizzazione dei tempi;
- 5D, gestione informativa economica, con analisi dettagliate dei costi per pianificazioni più accurate;
- 6D, valutazione della sostenibilità, considerando fattori sociali, economici e ambientali;
- 7D, gestione e Facility Management, per supportare la manutenzione e il ciclo di vita dell'opera.

Oltre a queste, attualmente sono in fase di discussione ulteriori dimensioni, ovvero:

- 8D, sicurezza degli ambienti di lavoro;
- 9D, gestione lean ed efficienza dei processi (massimizzazione del valore dell'asset riducendo al minimo gli sprechi);
- 10D, industrializzazione delle costruzioni al fine di ottimizzare ogni fase del ciclo di vita dell'opera.

Il presente lavoro è incentrato sugli aspetti riconducibili alla settima dimensione del BIM, ovvero quella relativa al ciclo di vita e manutenzione dell'opera e, nello specifico, al monitoraggio dei dati acquisiti da sensori che consentono le analisi prestazionali degli edifici, sia in fase di progettazione che di gestione del patrimonio storico costruito, grazie all'integrazione nei modelli BIM delle tecnologie IoT - Internet of Things.

Progettare interventi mirati al miglioramento delle prestazioni termiche degli edifici o al controllo del microclima di ambienti specifici, monitorando e analizzando i dati, è cruciale soprattutto nel caso della corretta conservazione di edifici di pregio o di opere d'arte situate al loro interno.

Grazie ai sensori IoT è infatti possibile monitorare ogni singolo aspetto legato alle condizioni ambientali rilevate all'interno dell'edificio, come ad esempio la temperatura e umidità dei vari locali, il livello di salubrità dell'aria, la concentrazione di CO₂, ecc.

La tecnologia IoT applicata ai modelli BIM consente quindi di realizzare i cosiddetti Digital Twin, i gemelli digitali, attraverso i quali è possibile mantenere un controllo continuo sullo stato dell'edificio e sulle condizioni di comfort e sicurezza dei suoi occupanti.

Oltre ai dati rilevati emerge tuttavia la necessità di avere sotto controllo da parte dei manutentori degli edifici la segnalazione di eventuali problematiche, con l'apertura di relativi ticket assegnati in base alle priorità degli interventi. La corretta gestione degli interventi di manutenzione garantisce la durabilità dell'opera, si pensi ad esempio a eventuali infiltrazioni dai serramenti o guasti all'impianto di riscaldamento e raffrescamento. Grazie a un'apposita applicazione nella quale andare a segnalare il guasto, questo può essere facilmente identificato, velocizzando così gli interventi di riparazione.

Un ulteriore aspetto legato alla gestione climatica degli ambienti interni riguarda la possibilità di disporre di uno strumento in grado di verificare se il microclima ambientale percepito dagli utenti in un determinato locale coincida con quanto rilevato dalle strumentazioni IoT.

Il feedback degli utenti consente di individuare situazioni per le quali, nonostante i parametri rilevati siano compresi in un range di valori ritenuto accettabile per quanto riguarda la conservazione degli spazi e delle opere conservate al loro interno, in realtà non rispecchino il comfort realmente percepito.

Disporre di un confronto tra la percezione degli utenti e quanto rilevato dai sistemi di monitoraggio risulta quindi essenziale per il Facility Manager nelle attività di gestione dell'edificio. Questo tipo di feedback può essere reso possibile, ad esempio, grazie a dei sondaggi puntuali effettuati tramite specifiche applicazioni.

Grazie a questi strumenti chiunque, sia il singolo utente che il Facility Manager, ha la possibilità di visualizzare e interagire con i dati rilevati al fine di intervenire in modo mirato e consapevole per la risoluzione dell'eventuale problematica.

Obiettivo della ricerca è quello di illustrare un flusso di lavoro in grado di visualizzare i dati previsti in fase di progettazione e quelli rilevati in loco, mettendoli a confronto con la valutazione soggettiva degli utenti, raccolta attraverso applicazioni dedicate.

Le soluzioni proposte si basano sull'impiego di metodi e tecnologie open source e a basso costo, riducendo la dipendenza da software proprietari e da competenze specialistiche avanzate, e sono applicate a casi studio differenti al fine di dimostrarne la scalabilità.

1.1 Inquadramento della ricerca

La digitalizzazione del settore delle costruzioni rende possibile l'ottimizzazione di tutte le fasi che caratterizzano il ciclo di vita di un bene costruito, sia che si tratti di edifici che di opere di altra natura, come infrastrutture quali ad esempio ponti e strade. Attraverso l'impiego del BIM è infatti possibile migliorare in modo integrato le fasi di progettazione, realizzazione, gestione e manutenzione, fino alle fasi di dismissione dell'opera.

Il BIM pertanto non si configura come un semplice modello tridimensionale, ma come un contenitore di informazioni che consente l'integrazione di dati eterogenei provenienti dalle varie discipline coinvolte nel processo edilizio (ingegneria, architettura, impiantistica, Facility Management, ecc.) raccolti in un unico ambiente digitale condiviso. Nel contesto della

presente ricerca, il BIM si inserisce nell'ampio dibattito dell'applicazione di questa metodologia all'architettura esistente.

La conservazione degli edifici del patrimonio culturale si confronta oggi con sfide sempre più complesse a causa di minacce ambientali come il cambiamento climatico, l'inquinamento atmosferico [11] e il naturale deperimento dei materiali legati all'usura e al passare del tempo. Oltre a tali criticità, un altro aspetto da tenere in considerazione, specialmente all'interno di edifici storici che ospitano mostre e musei, è quello legato alla corretta conservazione delle opere che vi sono contenute. Mantenere l'interno degli ambienti entro livelli di sicurezza per quanto riguarda concentrazioni di CO₂, VOC (composti organici volatili) e altri inquinanti, è necessario per prevenire il deterioramento o danneggiamento delle opere.

In questo ambito, il controllo e il monitoraggio continuo delle condizioni ambientali, reso possibile dalla sensoristica IoT, inserita in un processo che coinvolge la metodologia BIM, consente la creazione di un modello adattivo, capace di anticipare i rischi e minimizzare gli impatti. Ciò risulta particolarmente rilevante nel caso degli edifici storici, che richiedono interventi mirati, rispettosi dei vincoli architettonici e orientati alla sostenibilità.

Una volta riconosciuta l'importanza di queste tecnologie a supporto della gestione e della prevenzione del degrado del patrimonio storico, emerge la necessità di comprendere come integrarle tra loro in modo scalabile e facilmente gestibile, anche da parte di soggetti privi di competenze tecniche specifiche in ambito gestionale. La scelta del software da adottare, sia esso open source o proprietario, incide in modo significativo sul risultato finale. Inoltre, questa tematica ha una complessità tale da richiedere la creazione di un workflow costituito da numerosi software messi in comunicazione tra loro, ciascuno dei quali con una funzione specifica.

L'adozione di soluzioni libere e aperte può rappresentare un'opportunità significativa in contesti di ricerca e progetti specifici (ad esempio, quando l'utilizzo dei FOSS, Free and Open Source Software, è necessario per adattare gli strumenti a esigenze particolari).

Allo stesso tempo, tali soluzioni non rappresentano sempre la scelta ottimale per la progettazione di tutti i processi BIM e HBIM, specialmente nel caso di interventi su edifici complessi [12]. Esistono anche ulteriori criticità nell'uso di sistemi open source in ambito aziendale, tra cui la proliferazione delle versioni, la complessità e la necessità di numerose competenze trasversali e le difficoltà di implementazione in assenza di un soggetto unico responsabile dello sviluppo e della risoluzione dei problemi del software. A ciò si aggiungono gli alti costi a breve termine per i FOSS, ammortizzati però con costi a lungo termine più bassi rispetto a quelli del modello tradizionale realizzato con software proprietari [13].

L'utilizzo dei soli software proprietari comporta d'altra parte problematiche legate alla limitata possibilità di personalizzazione rispetto ai FOSS, di fatto limitando l'autonomia di gestione dei programmi e aumentando così i costi durante tutta la durata di utilizzo degli stessi. Ogni qualsivoglia modifica che si rende necessaria all'interno del modello è nella maggior parte dei casi subordinata all'intervento di operatori esterni legati alla software house proprietaria, riducendo così il controllo diretto sui dati e aumentando il rischio di perdita delle informazioni nel caso di mancato rinnovo della licenza del software.

In questo contesto articolato di possibilità e variabili, la presente ricerca mira a fornire una soluzione basata su software freeware e open source, proponendo al contempo un impianto

strutturato facilmente gestibile e implementabile in funzione delle diverse esigenze, anche da parte di soggetti non specialisti del settore.

1.2 Obiettivi

L'obiettivo della ricerca è dimostrare la fattibilità dell'utilizzo di standard e metodologie open source sia in fase di progettazione sia in fase di visualizzazione e verifica dei dati tramite modelli BIM, creando un flusso di lavoro scalabile e adattabile ai contesti degli edifici storici.

I tre macrotemi trattati, ovvero l'analisi delle prestazioni, il monitoraggio dei risultati e il riscontro da parte di utilizzatori e manutentori, sono strettamente correlati tra loro.

In tale contesto, la sensoristica IoT consente di verificare la corrispondenza tra quanto previsto in fase di progettazione e le prestazioni effettivamente rilevate; allo stesso tempo, una corretta interpretazione dei dati di monitoraggio richiede la conoscenza dei requisiti definiti in sede progettuale.

Il feedback fornito dagli utenti e dai manutentori riveste un ruolo altrettanto rilevante, poiché possono verificarsi situazioni per le quali, nonostante i parametri rilevati siano compresi in un range di valori ritenuto accettabile per quanto riguarda la conservazione degli spazi (e delle opere d'arte eventualmente conservate al loro interno), in realtà non rispecchino le percezioni avvertite dagli occupanti.

Inoltre, grazie alla possibilità di aprire ticket per la segnalazione dei guasti, i manutentori dispongono di un riscontro immediato delle problematiche rilevate e possono pianificare tempestivamente gli interventi risolutivi, facendo riferimento alle informazioni sui vincoli presenti, integrate all'interno del modello informativo opportunamente configurato.

La ricerca propone pertanto soluzioni open source, gratuite e con hardware a basso costo, per visualizzare in modo rapido e intuitivo gli aspetti sopracitati in un unico ambiente. Grazie a ciò, sia i Facility Manager che gli utenti potranno disporre di uno strumento di confronto diretto per l'individuazione di eventuali criticità e la definizione delle modalità di intervento più appropriate.

1.3 Contesto tecnologico

Nei paragrafi seguenti vengono descritte le componenti, sia metodologiche sia hardware e software che, una volta configurate e messe a sistema tra loro, andranno a costituire il flusso di lavoro adottato per la presente ricerca.

1.3.1 BIM: Building Information Modeling

La norma ISO 19650 definisce il Building Information Modeling (BIM) come *“the use of a shared digital representation of a built object to facilitate design, construction, and operation processes to form a reliable basis for decisions”* [5].

Il BIM si configura quindi come una metodologia che copre l'intero ciclo di vita di un'opera, dalle fasi di progettazione alla sua gestione sino alle operazioni di dismissione. Questa caratteristica di trasversalità rispetto a tutte le discipline coinvolte nel settore AEC

(Architecture, Engineering, Construction) lo rende uno strumento fondamentale sia per la realizzazione di nuove opere sia per gli interventi sul patrimonio edilizio esistente.

1.3.1.1 Storia dell'evoluzione del BIM

Come accennato nell'introduzione di Capitolo 1, sebbene si sia iniziato a parlare in maniera diffusa di BIM a partire dagli anni Duemila, la storia di come si sia arrivati alla sua definizione attuale parte da lontano.

Nel 1957 l'ingegnere della General Electric Patrick J. Hanratty (Fig. 1.2) sviluppò PRONTO (Program for Numerical Tooling Operations), il primo software commerciale di produzione assistita da computer (CNC - Computer Numerical Control Machines). Poco tempo dopo, Hanratty si dedicò alla grafica generata tramite computer e nel 1961 sviluppò DAC (Design Automated by Computer), che divenne il primo sistema CAM/CAD a utilizzare la grafica interattiva e fu utilizzato per i complessi stampi della General Motors [14]. Dopo alcuni fallimenti, causati essenzialmente da un linguaggio di programmazione impopolare, Hanratty affermò: *"Never generate anything closely coupled to a specific architecture. And make sure you keep things open to communicate with other systems, even your competitors."* [15], sottolineando quindi il valore dell'interoperabilità e apertura dei sistemi.

Nel 1962, Douglas C. Engelbart scrisse un articolo intitolato *Augmenting Human Intellect* [16], nel quale proponeva l'idea dell'architetto del futuro e il suo rapporto con le automazioni consentite dai computer, suggerendo una progettazione basata sugli oggetti, la manipolazione parametrica e un database relazionale; nell'articolo afferma: *"the architect next begins to enter a series of specifications and data—a six-inch slab floor, twelve-inch concrete walls eight feet high within the excavation, and so on. When he has finished, the revised scene appears on the screen. A structure is taking shape. He examines it, adjusts it. These lists grow into an ever more-detailed, interlinked structure, which represents the maturing thought behind the actual design."* Con il suo lavoro Engelbart pone l'attenzione su come questi elenchi di informazioni si trasformino in una struttura interconnessa sempre più dettagliata, che rappresenta la maturazione del pensiero alla base del design vero e proprio. Tutte queste informazioni, il progetto dell'edificio e la struttura di pensiero ad esso associata, possono essere memorizzate su nastro per rappresentare il manuale di progettazione dell'edificio stesso. Caricando questo nastro nel proprio sistema, un altro architetto, il costruttore o il cliente possono operare direttamente all'interno di questo manuale di progettazione per ricercare qualsiasi dettaglio o approfondimento desiderato oppure per aggiungere nuove informazioni utili agli utilizzatori futuri.

Un altro momento significativo nella storia dell'evoluzione della rappresentazione grafica, dai primi elaboratori al BIM, lo si ha nel 1963 quando, presso i Lincoln Labs del MIT, Ivan Sutherland (Fig. 1.3) sviluppò il primo Computer-Aided Design (CAD) con interfaccia grafica, Sketchpad [17].

Nel corso degli anni Settanta e Ottanta, a partire da queste prime sperimentazioni, si affermarono due principali approcci alla modellazione geometrica: la Constructive Solid Geometry (CSG) e la Boundary Representation (B-rep). In questa fase, il processo di progettazione richiedeva una relazione sempre più intuitiva tra l'utente e lo strumento informatico, ponendo come sfida centrale la possibilità di controllare il computer in modo semplice ed efficace [18].



Fig. 1.2: Patrick J. Hanratty - PRONTO
(fonte: www.aproplan.com/blog/a-history-of-bim)



Fig. 1.3: Ivan Sutherland - Sketchpad
(fonte: Sutherland, Ivan E., 1963)

Un contributo determinante per quanto riguarda la definizione del BIM moderno fu fornito da Charles Eastman, che nel 1975 pubblicò un articolo che descriveva un prototipo chiamato Building Description System (BDS) [19]. Con questa pubblicazione introdusse concetti quali progettazione parametrica, rappresentazioni 3D computabili di alta qualità e l'utilizzo di un unico database integrato per analisi visive e quantitative. Il documento di Eastman descriveva sostanzialmente il BIM come lo conosciamo oggi. Eastman progettò un programma che consentiva all'utente di accedere a un database ordinabile, le cui informazioni potevano essere recuperate categoricamente in base agli attributi (compresi materiali e fornitori); utilizzava inoltre un'interfaccia grafica, viste ortografiche e prospettiche. Il BDS è stato uno dei primi progetti nella storia del BIM a creare con successo questo database di edifici. Eastman concluse che il BDS avrebbe migliorato l'efficienza della stesura e dell'analisi e ridotto i costi di progettazione di oltre il cinquanta per cento. Il BDS è stato l'esperimento che ha identificato i problemi fondamentali della progettazione architettonica per i cinque decenni successivi. Successivamente, nel 1977, Eastman sviluppò GLIDE (Graphical Language for Interactive Design, Fig. 1.4) nel laboratorio della Carnegie Mellon University, un sistema che presentava la maggior parte delle caratteristiche della moderna piattaforma BIM [20] come, ad esempio, l'integrazione di informazioni spaziali e funzionali (materiale, peso e rigidità degli elementi), permettendo ai programmi applicativi di accedere e manipolare entrambi i tipi di dati senza la traduzione manuale richiesta dai disegni tradizionali.

```

POLY PROCEDURE spiral.step(POLY centre;
    REAL riser,radius,r,angle,th)=
    BEGIN
    POLY support =
        triangle(radius:0.95,-riser:0.8,th);
    POLY collar = column(12,riser,r);
    POLY plate = wedge(radius,th,angle);
    ! return the result of shape operations;
    CUT centre FROM COMBINE collar WITH
        COMBINE support WITH plate
    END;

To make spiral staircase, (dimensions in inches)
SET PROCEDURE spiral.stair(ht,radius,angle)=
    BSET; INTEGER numsteps; REAL riser;
    numsteps = ht/8.0;
    riser = ht/numsteps;
    POLY centre = column(12,ht+32.0,5.0);
    POLY step = spiral.step(centre,
        riser,radius,3.0,angle,0.625);
    FOR i TO numsteps
    DO COPY step=(0,riserxi \0,angle)il
    ESET;

SET stair1 = spiral.stair(100.0,46.0,30.0);
    
```

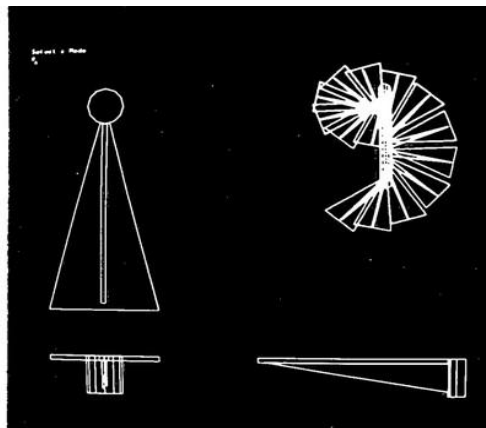


Fig. 1.4: GLIDE (fonte: www.aproplan.com/blog/a-history-of-bim)

GLIDE è stato quindi concepito per fornire un ambiente di calcolo di alto livello che integrasse le capacità di modellazione geometrica, funzionale e di database, offrendo al contempo flessibilità, estensibilità e una gestione efficiente dei dati per la progettazione di sistemi fisici complessi.

A partire dagli anni Ottanta si assistette a una proliferazione di software. Tra i più rilevanti troviamo ArchiCAD sviluppato dall'imprenditore ungherese Gábor Bojár a partire dal 1984 (Fig. 1.5), Vectorworks di Diehl Graphisoft del 1985, la prima applicazione CAD multiplatforma, e Pro/ENGINEER rilasciato dalla Parametric Technology Corporation (PTC) del 1988, considerato il primo software di modellazione parametrica mai commercializzato nella storia del BIM (Fig. 1.6).

Più tardi, Irwin Jungreis e Leonid Raiz, separandosi dalla PTC, fondarono la loro società di software, la Charles River Software, realizzando nel 2000 un programma chiamato Revit (una parola nata dalla contrazione di Revise-Instantly, a indicare la facilità di apportare modifiche in tempo reale all'interno del modello [21]). Essi volevano sviluppare una versione architettonica di Pro/ENGINEER in grado di gestire progetti più complessi di quanto potesse fare ArchiCAD. Revit ha rivoluzionato il BIM utilizzando un motore di modifica parametrico reso possibile dalla programmazione orientata agli oggetti e creando una piattaforma che permetteva di aggiungere attributi agli elementi del modello (Fig. 1.7).

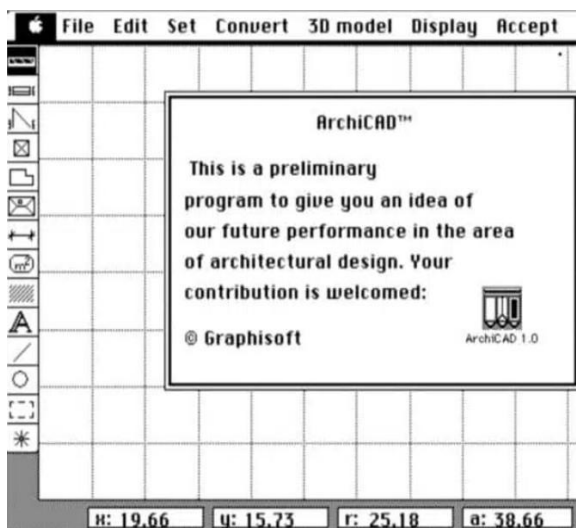


Fig. 1.5: ArchiCAD

(fonte: www.aproplan.com/blog/a-history-of-bim)

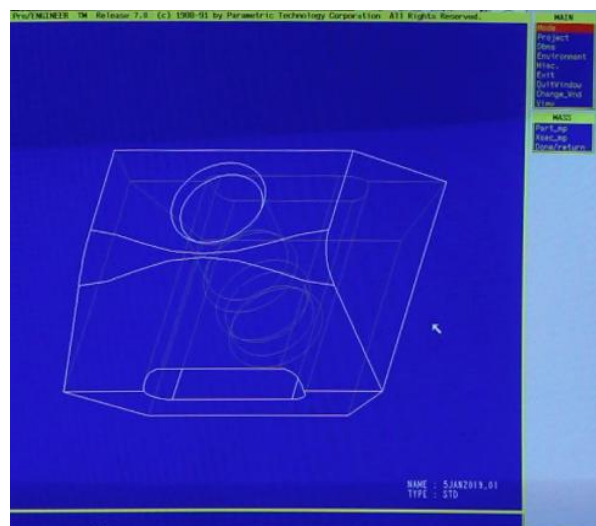


Fig. 1.6: Pro/ENGINEER

(fonte: www.youtube.com/watch?v=tY_Gy-EElc0)

Per quanto riguarda l'evoluzione dei termini e delle definizioni del BIM, Robert Aish ha documentato per la prima volta l'uso del termine *Building Modeling* in un articolo pubblicato nel 1986 [22]. In questo documento, sosteneva la necessità di ciò che oggi conosciamo come BIM e la tecnologia per implementarlo.

Pochi anni dopo, il primo uso documentato del termine *Building Information Model* è apparso in un articolo di G.A. Van Nederveen e F. Tolman su *Automation in Construction* del 1992 [23].

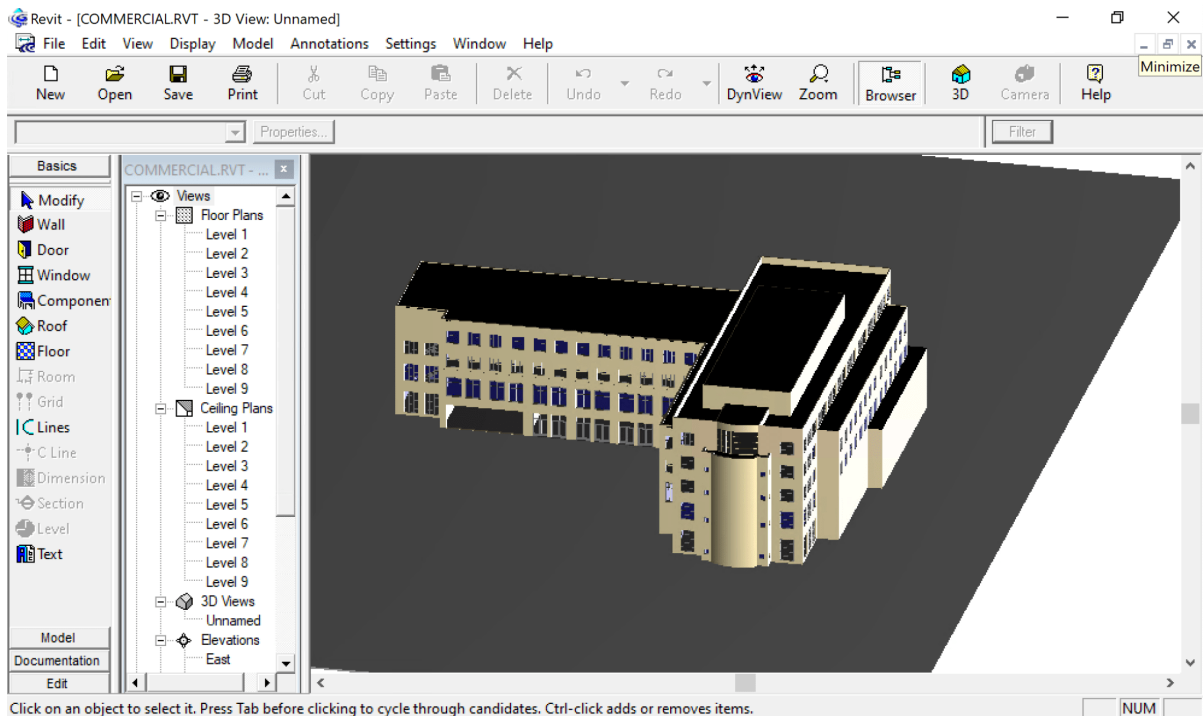


Fig. 1.7: Revit Release 1.0

(fonte: www.yobyot.com/revit/revit-release-1-0-20th-anniversary/2020/10/21)

Nel 1995 fu sviluppato il formato di file International Foundation Classes (IFC), di cui si parlerà in maniera più approfondita al paragrafo 1.3.4.1, per consentire il flusso dei dati tra le varie piattaforme, rendendo compatibile il medesimo file tra programmi BIM di diversa natura.

Nel 1997 ArchiCAD introdusse la prima soluzione Teamwork basata sulla collaborazione tramite scambio di file. Questa soluzione ha rivoluzionato la collaborazione tra i team e ha permesso a più architetti di lavorare contemporaneamente su un modello di edificio [24]. In seguito, gli aggiornamenti di Teamwork hanno consentito l'accesso remoto allo stesso progetto tramite Internet, permettendo la collaborazione e il coordinamento del progetto su scala più ampia.

Nel 1999, in Giappone, grazie a Onuma System, è stato possibile per cosiddetti *virtual team* lavorare in maniera collaborativa attraverso Internet creando un sistema di pianificazione basato su database, aprendo così la strada alla futura integrazione multiplatforma dei software BIM [25].

Da allora molti altri passi sono stati effettuati per arrivare alla moderna concezione di BIM e di tutto ciò che gravita attorno ad esso, come ad esempio lo sviluppo del concetto di Digital Twin legati alle tecnologie Internet of Things, che verranno approfonditi nei paragrafi 1.3.5 e 1.3.6 del presente lavoro, o l'introduzione degli standard openBIM (paragrafo 1.3.4) i quali consentono di ampliare in maniera indipendente la gamma di possibilità di utilizzo del BIM in ambiti sempre più specifici.

Di seguito, in Fig. 1.8, viene riportato lo schema delle tappe significative sullo sviluppo del BIM [26].

The emerging concept of BIM			Spreading the idea of BIM		
1950s 1960s 1970s	1980s	1990s	2000s	2010s	2020s
1957 - PRONTO	1982 - AutoCAD	1991 - Microstation 3D	2000 - Revit presentation	2010 - BCF	2022 - AI
1962 - article by D.Engelbart	1983 - RADAR CH (Graphisoft Archicad)	1992 - paper by van Neederven and Tolman	2001 - VDC term	2011 - AR/VR	
1963 - Sketchpad	1985 - MiniCad (Vectorworks)	1992 - DXF format	2002 - series of articles by J.Laiserin	2012 - openBIM concept	
1964 - book by Ch.Alexander	1986 - "building modelling" in a publication by R.Aish	1996 - Reflex	2002 - first digital twin by M.Grieves	2013 - IoT	
1973 - BDS by Ch. Eastman	1986 - SONATA	1997 - Charles River Software	2004 - Effort/Effect curve by P.MacLeamy	2015 - Blockchain	
1977 - GLIDE	1988 - Pro/ENGINEER	1997 - IFC 1.0	2008 - the Bew-Richards ramp	2018 - Machine Learning	

nature of events		epoch-making event
		milestone event
		relevant event

Fig. 1.8: Eventi significativi dello sviluppo del BIM (fonte: Borkowski, 2023)

1.3.2 Il BIM tra presente e futuro

Il progresso tecnologico e il suo impiego nel settore AEC hanno subito una profonda evoluzione nell'ultimo decennio. Tecnologie come l'intelligenza artificiale (Artificial Intelligence, AI), il cloud computing (CC), la realtà virtuale (Virtual Reality, VR), l'analisi dei dati (Data Analytics, DA), l'Internet of Things (IoT), la scansione laser (Laser Scanning, LS) e l'apprendimento automatico (Machine Learning, ML) hanno apportato significativi benefici all'ambiente delle costruzioni [27]. Grazie alla diffusione di tali tecnologie applicate al BIM, le possibilità di estendere ulteriormente la digitalizzazione dell'ambiente costruito risultano molteplici e interessano tutti gli aspetti legati al ciclo di vita e alla gestione di un'opera.

L'impiego dell'intelligenza artificiale, ad esempio, sta progressivamente modificando il modo in cui i modelli BIM vengono analizzati, ottimizzati e gestiti. L'AI consente di automatizzare attività complesse, quali la determinazione delle interferenze tra le discipline coinvolte nel processo edilizio in fase di progettazione, le analisi predittive in ambito energetico, o la restituzione in ambiente BIM di rilievi laser scanner di edifici storici, solo per citare alcuni esempi. Nei processi di Facility Management, l'AI può essere utilizzata per monitorare le condizioni ambientali e operative di un edificio in tempo reale e suggerire interventi manutentivi predittivi [28].

A ulteriore conferma della grande versatilità di questa metodologia, negli ultimi anni il BIM ha assunto un ruolo importante anche nella pianificazione urbana [29]. Il Geographic Information

Systems (GIS) applicato ai modelli BIM consente la creazione delle cosiddette Smart Cities, aprendo nuove possibilità nella pianificazione e gestione intelligente delle città, migliorando l'interoperabilità e l'efficienza dei processi decisionali.

Tuttavia, il connubio tra il BIM e queste nuove tecnologie digitali emergenti deve ancora confrontarsi con sfide pratiche, tecniche, commerciali, culturali e organizzative nel settore AEC [30]. È noto, infatti, come tale settore risulti più lento nell'adozione di nuovi metodi e strumenti rispetto ad altri ambiti produttivi, come quello manifatturiero. Ciò è in parte riconducibile alla natura complessa, rischiosa e onerosa della maggior parte dei processi edilizi, dove piccoli errori hanno spesso implicazioni rilevanti, nonché alla tendenza a privilegiare pratiche consolidate rispetto a nuove tecnologie che, almeno inizialmente, non godono dello stesso livello di fiducia [31].

Nonostante tali resistenze, il BIM è progressivamente destinato ad assumere un ruolo di riferimento tra i diversi sistemi digitali richiamati nel presente paragrafo, configurandosi come un'infrastruttura informativa per la gestione integrata e intelligente del costruito a diverse scale, dal singolo edificio alla pianificazione urbana, includendo le infrastrutture che connettono tali sistemi.

1.3.3 HBIM: Heritage Building Information Modeling

A breve distanza dall'inizio della diffusione del BIM in ambito professionale, la comunità scientifica ha iniziato a interrogarsi sulle modalità di adattamento di tale metodologia al contesto di edifici caratterizzati da esigenze peculiari, come quelli storici. In particolare, nel 2009, a seguito di uno studio condotto dal prof. Maurice Murphy del Dublin Institute of Technology, viene introdotta per la prima volta la definizione di HBIM (Heritage Building Information Modeling). Tale approccio viene descritto come un processo di reverse engineering finalizzato alla creazione di modelli informativi tridimensionali in grado di includere informazioni relative ai metodi costruttivi e alla composizione dei materiali, a partire da rilievi ottenuti mediante laser scanning del manufatto oggetto di studio (Fig. 1.9) [32].

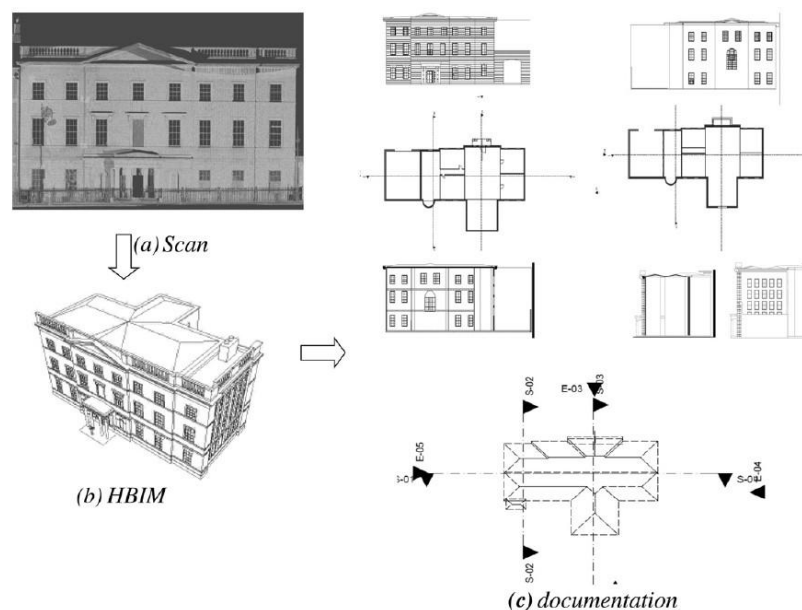


Fig. 1.9: From Scan to HBIM. (fonte: Murphy et al., 2009)

Un ulteriore elemento distintivo dell'approccio HBIM riguarda la creazione di librerie di elementi architettonici parametrici, sviluppate attraverso lo studio dell'evoluzione dei trattati e dei manoscritti storici (Fig. 1.10), con l'obiettivo di individuare e formalizzare regole geometriche e costruttive significative. Tali regole risultano rappresentative di un'ampia gamma di edifici di epoca classica e possono essere applicate alla modellazione digitale degli elementi architettonici [33].

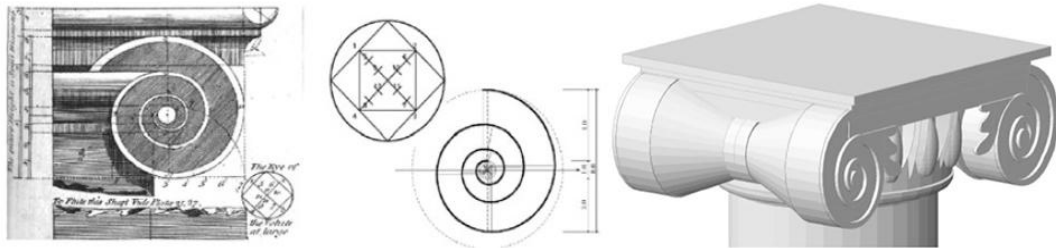


Fig. 1.10: Modellazione di elementi HBIM (fonte: Murphy et al., 2009)

Le forme così definite vengono memorizzate come oggetti parametrici singoli o combinati in librerie e, una volta utilizzate all'interno delle piattaforme HBIM, possono essere adattate e modificate in funzione delle specificità del caso oggetto di studio.

Nonostante la necessità di adattare il BIM alle peculiarità del patrimonio storico, quali l'eterogeneità morfologica degli edifici, la mancanza di documentazione standardizzata, l'elevato valore culturale da preservare e l'esigenza di interventi minimi e reversibili, solo in anni recenti si sta assistendo a un suo graduale e sistematico utilizzo anche in ambito applicativo. Tale tendenza è testimoniata, ad esempio, dall'esponentiale aumento del numero di pubblicazioni scientifiche a partire dall'anno 2015, con solo una leggera flessione negli anni 2021/2022, come si evince da Fig. 1.11 (fonte: Scopus, query: TITLE-ABS-KEY ((hbim OR historic* AND bim OR heritage AND bim)) AND PUBYEAR > 1999 AND PUBYEAR < 2025).

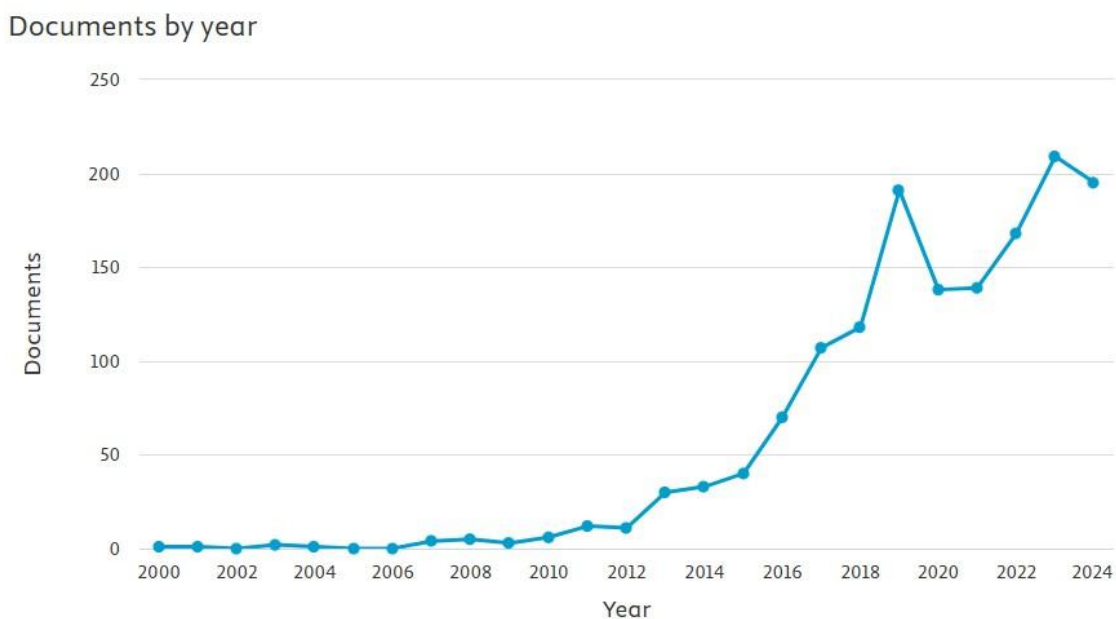


Fig. 1.11: Andamento pubblicazioni HBIM (fonte: Scopus)

Una delle prime sfide affrontate dall'HBIM, che ne limitò in un primo momento la diffusione, fu la necessità di utilizzare strumenti molto costosi, quali i laser scanner. Inoltre, i nuovi software da utilizzare richiedevano competenze specifiche in un settore ancora inesplorato e a tutto ciò si sommava la necessità di avere professionisti qualificati per gestire ed elaborare i dati scansionati. Infine, l'elaborazione dei dati acquisiti per produrre una nuvola di punti utilizzabile richiedeva molto tempo, in particolare per set di dati di grandi dimensioni con elevata densità di punti da gestire [34].

Non sorprende pertanto che nonostante il BIM abbia iniziato a diffondersi intorno all'anno Duemila, come visto nel paragrafo 1.3.1.1, per l'HBIM si sia dovuto attendere circa una decina d'anni prima che iniziasse a essere preso maggiormente in considerazione nei processi edilizi. Un ulteriore aspetto da considerare riguarda il fatto che i progetti sul patrimonio storico si basano tipicamente su un livello di collaborazione multidisciplinare generalmente superiore rispetto a quanto avviene nei processi di nuova realizzazione. Tali progetti coinvolgono infatti figure specialistiche quali storici, restauratori, conservatori e altri esperti, chiamati a scambiare e interpretare dati e informazioni complesse al fine di valutare lo stato di conservazione degli edifici. Tale valutazione rappresenta il presupposto fondamentale per la definizione delle strategie di intervento efficaci e coerenti con i vincoli di tutela.

Le tendenze per il futuro sono promettenti, e sottolineano il miglioramento dei metodi e degli strumenti per la conversione automatica delle nuvole di punti in modelli parametrici HBIM, riducendo le imprecisioni e le attuali gravi semplificazioni delle nuvole di punti, nonché l'estensione dello standard IFC per risolvere i problemi di interoperabilità [35].

Come illustrato nel paragrafo 1.3.2 relativo alle nuove tecnologie applicate al BIM, queste contribuiscono a rendere più efficaci gli approcci operativi adottati anche nel contesto del patrimonio storico. Il monitoraggio mediante sensoristica IoT, che consente la realizzazione del Digital Twin dell'edificio (Fig. 1.12), assume grande rilevanza nell'ambito dell'HBIM, in quanto si tratta di manufatti storici con esigenze specifiche di conservazione. La possibilità di controllare da remoto parametri ambientali, come la qualità dell'aria, livelli di illuminamento, ecc., consente un'efficace gestione preventiva finalizzata alla preservazione del bene [36] e delle opere contenute al suo interno, nel caso si tratti di spazi adibiti a mostre o musei.

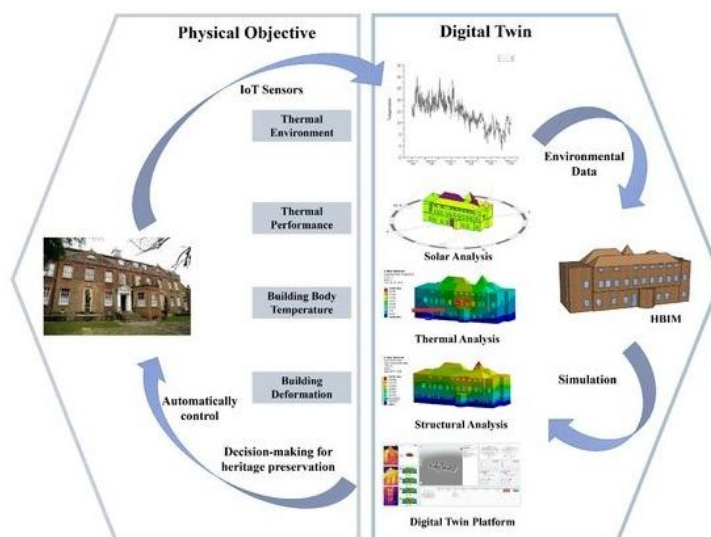


Fig. 1.12: Digital Twin - HBIM (fonte: Cheng et al., 2024)

Altro strumento emergente di grande efficacia se correttamente configurato all'interno del patrimonio storico è quello legato all'intelligenza artificiale. L'utilizzo dell'AI nelle fasi di scansione e post-processing consente di identificare e classificare gli elementi costitutivi dell'edificio come entità riconoscibili e semanticamente definite, anziché come semplici superfici geometriche. Gli algoritmi di intelligenza artificiale possono inoltre ripristinare il percorso dei punti in aree dove la scansione era tecnicamente incompleta o aveva una copertura insufficiente, riducendo così il tempo e la manodopera necessari per la modellazione manuale e migliorando l'accuratezza complessiva del modello.

Le tecnologie immersive, infine, offrono nuove opportunità per la documentazione e la valorizzazione del patrimonio, creando repliche digitali precise e offrendo nuovi modi per condividere, ricercare, educare e intrattenere. Tali soluzioni favoriscono un maggiore coinvolgimento degli utenti, consentendo la trasmissione delle informazioni storiche in modalità più immersive rispetto agli approcci tradizionali (Fig. 1.13).



Fig. 1.13: Museo Egizio Torino (fonte: www.museoegizio.it/scopri/tour-virtuali)

La possibilità di interagire direttamente con il modello digitale dell'edificio consente quindi di arricchire ulteriormente il Digital Twin, fornendo un'esperienza immersiva con un impatto diretto sul coinvolgimento degli utenti e sulle interazioni degli stakeholder, facilitando il processo decisionale legato alla gestione degli edifici e consentendo valutazioni a distanza. In sintesi, l'applicazione congiunta di scansione laser, intelligenza artificiale, realtà virtuale e IoT nell'ambito dell'HBIM consente la realizzazione di Digital Twin completi e aggiornabili del patrimonio costruito, trasformando il modo in cui questo viene documentato, analizzato, gestito, promosso e preservato per le generazioni future [37].

1.3.4 Standard openBIM

Prima di approfondire nel dettaglio le tematiche riguardanti i singoli standard e di come questi sono stati utilizzati nel workflow della presente ricerca, è importante approfondire il concetto stesso di openBIM.

Con il termine openBIM si fa riferimento a un approccio al Building Information Modeling basato sull'adozione di standard aperti e condivisi, promossi da buildingSMART International (bSI). Tali standard consentono di migliorare la collaborazione tra piattaforme software differenti, garantendo che i dati possano essere scambiati, interpretati e riutilizzati in modo coerente lungo l'intero ciclo di vita di un progetto [38].

Tuttavia, l'openBIM non si riferisce a un singolo strumento o metodo, bensì a un quadro di riferimento composto da un insieme di standard (tra cui IFC, BCF, IDS e altri) che promuovono l'interoperabilità (Fig. 1.14). L'obiettivo è la creazione di un ecosistema digitale nel quale strumenti diversi possano dialogare efficacemente tra loro, riducendo la dipendenza da formati proprietari e da flussi di lavoro chiusi.

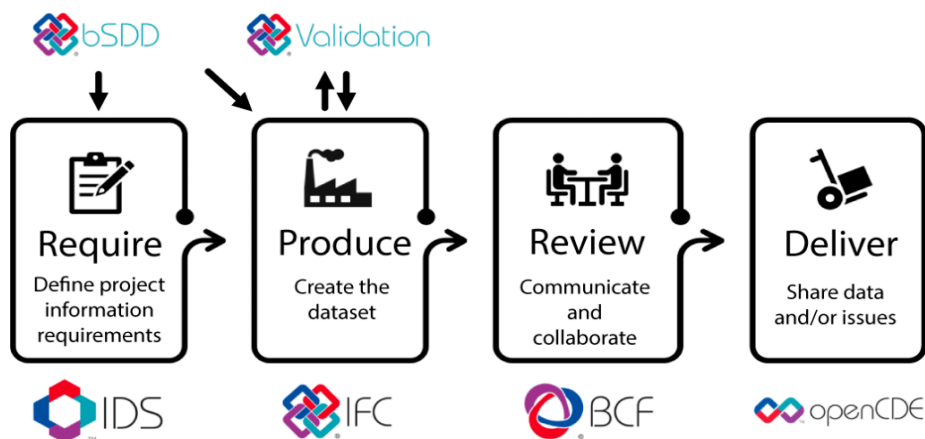


Fig. 1.14: Standard openBIM (fonte: buildingSMART International)

È importante sottolineare come non esista un flusso di lavoro unico e universale: ciò che risulta efficace per un progetto potrebbe non esserlo in un altro contesto. A seconda delle esigenze specifiche e degli strumenti coinvolti, questi standard possono essere configurati tra loro in modo flessibile, senza perdere al contempo la caratteristica primaria legata all'interoperabilità.

Vengono di seguito descritti brevemente i singoli standard:

- IFC: Industry Foundation Classes, formato di interscambio neutrale e aperto che sta alla base dell'approccio openBIM, nato per facilitare l'interoperabilità tra le discipline;
- IDS: Information Delivery Specification, specifiche informative che definiscono i requisiti che un modello BIM in formato IFC deve soddisfare per essere idoneo agli obiettivi del progetto;
- BCF: BIM Collaboration Format, formato che consente la comunicazione e la collaborazione tra utenti di applicazioni BIM e non BIM, permettendo la gestione di commenti, issue e richieste senza modificare direttamente il modello IFC;
- bSDD: buildingSMART Data Dictionary, il dizionario di dati che rende possibile la classificazione univoca delle definizioni dei singoli elementi costituenti il modello;

- IFC Validation Service: piattaforma online gratuita per la validazione dei file IFC rispetto a determinati requisiti;
- openCDE: standard volto a garantire l'interoperabilità tra diversi Common Data Environment (CDE), ossia ambienti digitali condivisi utilizzati per gestire e scambiare informazioni nei progetti BIM.

Grazie alla maggior comprensione di questi standard, ognuno dei quali ha un proprio sviluppo autonomo, è possibile operare in un contesto coerente con i principi dell'openBIM e, più in generale, dell'open source. Ciò permette di definire flussi di lavoro più flessibili, trasparenti e meno dipendenti da soluzioni proprietarie, come nel caso del workflow proposto nella presente ricerca per la visualizzazione dello stream di dati all'interno dei modelli BIM e HBIM. Nei paragrafi successivi vengono pertanto approfonditi gli standard openBIM effettivamente utilizzati nel presente studio.

1.3.4.1 IFC

Il settore delle costruzioni richiede uno scambio coordinato di informazioni tra i diversi professionisti coinvolti lungo tutte le fasi del ciclo di vita di edifici e infrastrutture, non limitandosi alle sole attività di progettazione. Le software house operanti sul mercato sono numerose e, nella maggior parte dei casi, sviluppano soluzioni proprietarie caratterizzate da una limitata capacità di interoperabilità con altri sistemi.

Per questo motivo, risulta necessario promuovere l'approccio openBIM, basato sulla condivisione dei dati indipendentemente dall'utilizzo di software e piattaforme proprietarie, al fine di facilitare l'interazione tra i diversi stakeholder coinvolti nel processo edilizio.

In questo contesto, grazie al lavoro svolto da buildingSMART International sin dai primi anni Novanta, quando operava sotto il nome di Industry Alliance for Interoperability, è stato sviluppato lo schema IFC (Industry Foundation Classes), finalizzato alla mappatura delle entità, delle relazioni e dei processi propri del settore delle costruzioni (Fig. 1.15).

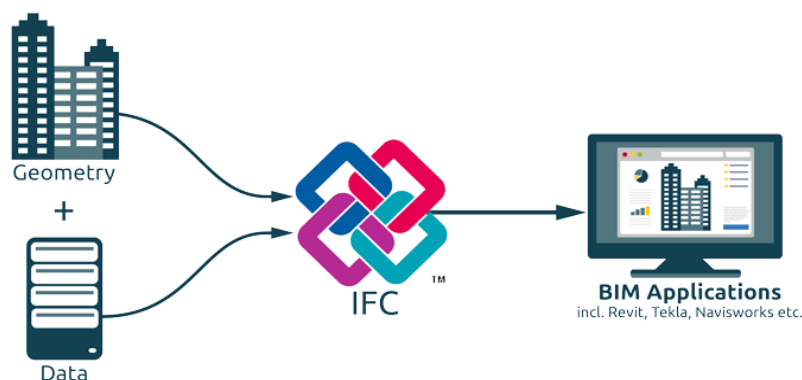


Fig. 1.15: Industry Foundation Classes IFC (fonte: buildingSMART International)

Nel 2013, con la pubblicazione della norma ISO 16739, lo schema IFC è diventato uno standard riconosciuto a livello internazionale. Successivamente, nel 2018, la norma è stata aggiornata approvando la versione IFC4, fino al 2024, quando è stata pubblicata la versione ISO 16739-1:2024 [39] che rappresenta al giorno d'oggi la versione formale più recente dello schema, ossia IFC4.3 [40].

Nello specifico, l'IFC viene definito come *“a set of standardized, digital descriptions of the built asset industry. It is an open, global standard published under a Creative Commons license, and as ISO 16739. IFC provides machine interpretability of information and thereby enables automation of workflows. It is vendor-neutral and available to everyone”* [41].

IFC è quindi un formato file aperto non proprietario, che può essere utilizzato per lo scambio di dati durante tutto l'arco di vita di un'opera, dalla progettazione sino alle fasi di gestione e manutenzione. Lo schema IFC può essere identificato come un sistema di archiviazione per l'organizzazione e il trasferimento di dati digitali, al fine di facilitare l'interoperabilità tra diversi soggetti. Questo schema si basa su tre concetti fondamentali (Fig. 1.16):

- Entità, organizzate gerarchicamente in classi che definiscono gli elementi del costruito (ad esempio IfcWall, IfcWindow, IfcGrid, IfcSensor);
- Proprietà, organizzate in Property Set (Pset), che completano e meglio definiscono le caratteristiche delle entità (ad esempio Pset_WallCommon, Pset_Warranty);
- Relazioni, che collegano tra loro le entità nell'ottica di un sistema integrato e interrogabile (ad esempio IfcRelAggregates, IfcRelAssignsToGroup).

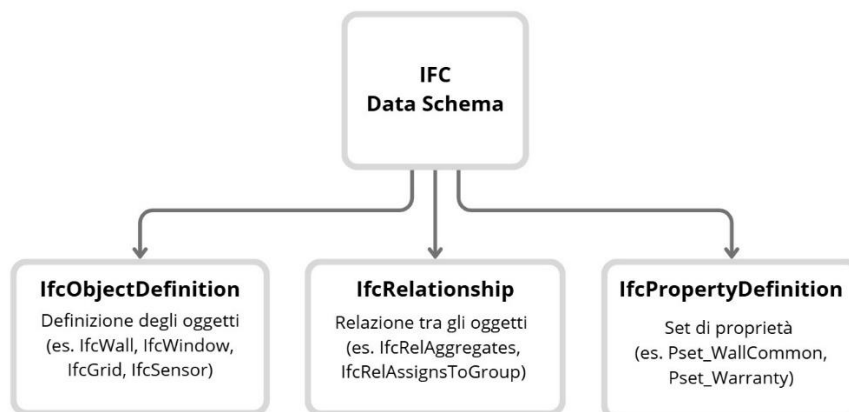


Fig. 1.16: Schema IFC

I dati IFC possono essere acquisiti (serializzati) all'interno di file in formato *.ifc* (basati sul formato STEP) o in altri formati alternativi come *.ifcXML* o *.ifcZIP*. Ciò conferma come lo standard IFC vada oltre la semplice definizione di un formato di interscambio, configurandosi come un modello concettuale e semantico per la rappresentazione strutturata delle informazioni del costruito.

Prendendo come esempio la classe IfcWall, (Fig. 1.17) è possibile comprendere la struttura di un file IFC: l'elemento è identificato tramite un GlobalId univoco ed è descritto da una serie di attributi che includono, tra gli altri, le informazioni sul creatore dell'oggetto (OwnerHistory), il nome dell'elemento (Name, in questo caso "Muro di Base: M01"), la collocazione spaziale all'interno del progetto (ObjectPlacement) e il tipo predefinito (PredefinedType), utile per distinguere la funzione specifica dell'elemento, ad esempio muro portante, tramezza o parapetto (Fig. 1.18).

```

#1233=IFCWALL('15VVi8gZr3bPpK1wIrdFur',#18,'Muro di base:M01,$,'PT-48 cm',#1003,#1232,'685548',.NOTDEFINED.);

#18=IFCOWNERHISTORY(#17,#2,$,.NOCHANGE,$,$,$,1697556632);
#17=IFCPERSONANDORGANIZATION(#15,#16,$);
#15=IFCPERSON($,'','1.fontanella',$,$,$,$);
#16=IFCORGANIZATION($,'','',$,$);
#2=IFCAPPLICATION(#1,'2024','Autodesk Revit 2024 (ITA)','Revit');
#1=IFCORGANIZATION($,'Autodesk Revit 2024 (ITA)',,$,$);

#1003=IFCLOCALPLACEMENT(#115,#1002);
#115=IFCLOCALPLACEMENT(#107,#114);
#107=IFCLOCALPLACEMENT(#130,#106);
#130=IFCLOCALPLACEMENT($,#129);
#129=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#3,$,$);
#3=IFCCARTESIANPOINT((0.,0.,0.));
#106=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#3,$,$);
#3=IFCCARTESIANPOINT((0.,0.,0.));
#114=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#3,$,$);
#3=IFCCARTESIANPOINT((0.,0.,0.));
#1002=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#1001,$,$);
#1001=IFCCARTESIANPOINT((1.2743273260729602,-3.4277250311485967,-0.5099999999999999));

#1232=IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE($,$,(#1006,#1231));
#1006=IFCSHAPEREPRESENTATION(#100,'Axis','Curve2D',(#1005));
#100=IFCGEOMETRICREPRESENTATIONSUBCONTEXT('Axis','Model',*,*,*,#99,$,.GRAPH_VIEW,$);
#99=IFCGEOMETRICREPRESENTATIONCONTEXT($,'Model',3,1.0000000000000001E-05,#97,#98);
#97=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#3,$,$);
#3=IFCCARTESIANPOINT((0.,0.,0.));
#98=IFCDIRECTION((6.1230317691118863E-17,1.));
#1005=IFCPOLYLINE((#4,#1004));
#4=IFCCARTESIANPOINT((0.,0.));
#1004=IFCCARTESIANPOINT((8.8000000000000043,0.));
#1231=IFCSHAPEREPRESENTATION(#101,'Body','Brep',(#1226));
#101=IFCGEOMETRICREPRESENTATIONSUBCONTEXT('Body','Model',*,*,*,#99,$,.MODEL_VIEW,$);
#99=IFCGEOMETRICREPRESENTATIONCONTEXT($,'Model',3,1.0000000000000001E-05,#97,#98);
#97=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#3,$,$);
#3=IFCCARTESIANPOINT((0.,0.,0.));
#98=IFCDIRECTION((6.1230317691118863E-17,1.));
#1226=IFCFACETEBREP(#1225);
#1225=IFCCLOSEDSHELL((#1042,#1079,#1084,#1093,#1096,#1101,#1104,#1107,#1112,#1117,#1122,#1129,#1132

```

Fig. 1.17: IfcWall – esempio di struttura IFC

Type	Description
ELEMENTEDWALL	A stud wall framed with studs and faced with sheetings, sidings, wallboard, or plasterwork. <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> IFC4.3.2.0-CHANGE This enumeration value is no longer deprecated. </div> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px;"> NOTE An elemented wall can be modelled by means of an aggregation of various components (use <i>IfcRelAggregates</i> to relate to the <i>IfcV</i> when this amount of detail is not necessary or available this enumeration value can be used instead. </div>
MOVABLE	A movable wall that is either movable, such as folding wall or a sliding wall, or can be easily removed as a removable partitioning or mount. Movable walls do normally not define space boundaries and often belong to the furnishing system.
PARAPET	A wall-like barrier to protect human or vehicle from falling, or to prevent the spread of fires. Often designed at the edge of balconies, terraces or along edges of bridges.
PARTITIONING	A wall designed to partition spaces that often has a light-weight, sandwich-like construction (e.g. using gypsum board). Partitioning walls are non load bearing.
PLUMBINGWALL	A pier, or enclosure, or encasement, normally used to enclose plumbing in sanitary rooms. Such walls often do not extend to the ceiling.
POLYGONAL	A polygonal wall, extruded vertically, where the wall thickness varies along the wall path. <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px;"> IFC4-DEPRECATION 🔗 The value is deprecated and shall no longer be used. </div>
RETAININGWALL	A supporting wall used to protect against soil layers behind. Special types of a retaining wall may be e.g. Gabion wall and Grib wall. Example retaining walls are wing wall, headwall, stem wall, pierwall and protecting wall.
SHEAR	A wall designed to withstand shear loads. Examples of shear wall are diaphragms inside a box girder, typically on a pier, to resist lateral force transfer them to the support.
SOLIDWALL	A massive wall construction for the wall core being the single layer or having multiple layers attached. Such walls are often masonry or concrete (both cast in-situ or precast) that are load bearing and fire protecting.
STANDARD	A standard wall, extruded vertically with a constant thickness along the wall path. <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px;"> IFC4-DEPRECATION 🔗 The value is deprecated, it is expressed by using an <i>IfcMaterialLayerSet</i> with <i>IfcMaterialLayerSetUsage</i> in occurrence. </div>
WAVEWALL	Protective wall or screen to block overtopping and impact of waves across a breakwater
USERDEFINED	User-defined wall element.
NOTDEFINED	Undefined wall element.

Fig. 1.18: PredefinedType della classe IfcWall (fonte: buildingSMART International)

Oltre agli attributi, rientrano nel campo delle relazioni codificate all'interno dello schema le proprietà. Queste si riferiscono a caratteristiche funzionali per specifici utilizzi che accomunano singole istanze e possono essere di tipo prestazionali (Property Set - Pset) o di tipo quantitativo (Quantities Set - Qto). In Fig. 1.19 è possibile osservare i vari Pset associati alla classe IfcWall presenti nello schema IFC4.3.

Pset_ConcreteElementGeneral AssemblyPlace CastingMethod StructuralClass	Pset_Condition AssessmentDate AssessmentCondition AssessmentDescription	Pset_ConstructionAdministration ProcurementMethod SpecificationSectionNumber SubmittalIdentifier
Pset_ConstructionOccurrence InstallationDate ModelNumber TagNumber	Pset_ElementKinematics CyclicPath CyclicRange LinearPath	Pset_EnvironmentalCondition ReferenceAirRelativeHumidity ReferenceEnvironmentTemperature MaximumAtmosphericPressure
Pset_EnvironmentalImpactIndicators Reference FunctionalUnitReference IndicatorsUnit	Pset_EnvironmentalImpactValues TotalPrimaryEnergyConsumption WaterConsumption HazardousWaste	Pset_InstallationOccurrence InstallationDate AcceptanceDate PutIntoOperationDate
Pset_MaintenanceStrategy AssetCriticality AssetFrailty AssetPriority	Pset_MaintenanceTriggerCondition ConditionTargetPerformance ConditionMaintenanceLevel ConditionReplacementLevel	Pset_MaintenanceTriggerDuration DurationTargetPerformance DurationMaintenanceLevel DurationReplacementLevel
Pset_MaintenanceTriggerPerformance TargetPerformance PerformanceMaintenanceLevel ReplacementLevel	Pset_ManufacturerOccurrence AcquisitionDate BarCode SerialNumber	Pset_ManufacturerTypeInfoInformation GlobalTradeItemNumber ArticleNumber ModelReference
Pset_PrecastConcreteElementFabrication TypeDesignation ProductionLotId SerialNumber	Pset_PrecastConcreteElementGeneral TypeDesignation CornerChamfer ManufacturingToleranceClass	Pset_ReinforcementBarPitchOfWall Description Reference BarAllocationType
Pset_RepairOccurrence RepairContent RepairDate MeanTimeToRepair	Pset_Risk RiskName RiskType NatureOfRisk	Pset_RoadGuardElement PARAPET IsMoveable IsTerminal IsTransition
Pset_ServiceLife ServiceLifeDuration MeanTimeBetweenFailure	Pset_Tolerance ToleranceDescription ToleranceBasis OverallTolerance	Pset_Uncertainty UncertaintyBasis UncertaintyDescription HorizontalUncertainty
Pset_WallCommon Reference Status AcousticRating	Pset_Warranty WarrantyIdentifier WarrantyStartDate IsExtendedWarranty	Qto_BodyGeometryValidation GrossSurfaceArea NetSurfaceArea GrossVolume
Qto_WallBaseQuantities Length Width		

Fig. 1.19: Property set della classe IfcWall (fonte: buildingSMART International)

Il principale punto di forza che caratterizza lo schema IFC è, oltre alla definizione dei singoli elementi che compongono un modello, l'insieme delle relazioni che intercorrono tra questi e le rispettive proprietà. La classe che svolge questa funzione all'interno dello schema è IfcRelationship.

Le relazioni sono molteplici (Fig. 1.20) e ognuna di esse svolge una funzione specifica. Ad esempio, tramite IfcRelAssociatesMaterial è possibile associare una stratigrafia (IfcMaterialLayerSet) a un muro (IfcWall), oppure IfcRelConnects può essere utilizzato per computare il numero di arredi presenti all'interno di un locale, mentre al fine di leggere in maniera univoca una tubazione composta da numerose parti, si utilizza IfcRelNests, solo per citare qualche esempio.

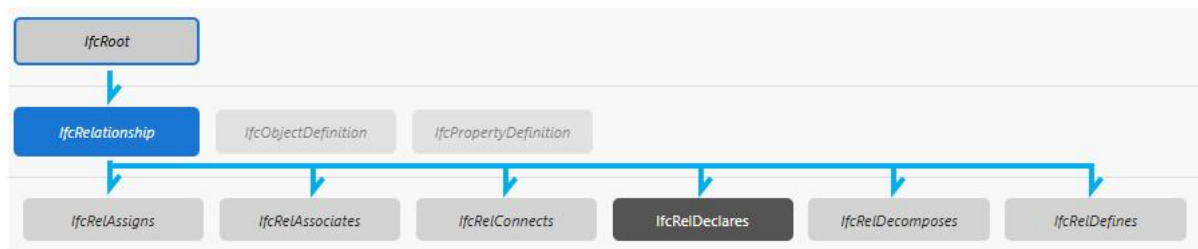


Fig. 1.20: IfcRelationship (fonte: buildingSMART International)

Ogni versione di IFC è associata a una serie di Model View Definition (MVD) ufficiali rilasciate da buildingSMART International [42]. Le MVD possono essere intese come dei sottogruppi dello standard IFC, pensati per supportare specifici casi d'uso o flussi di lavoro nel processo BIM. In pratica, possono essere viste come dei filtri che definiscono quali entità, proprietà e relazioni del modello IFC devono essere incluse per garantire interoperabilità tra software differenti.

Al fine di salvaguardare l'interoperabilità openBIM, le MVD devono essere gestite, riviste e approvate da un'unica autorità centrale, buildingSMART International. In caso contrario, la proliferazione di MVD personalizzate e non coordinate tra loro comprometterebbe il corretto scambio di informazioni tra modelli, venendo così meno allo scopo principale dell'approccio openBIM.

Le MVD che sono state rilasciate ufficialmente da buildingSMART e attualmente disponibili sono le seguenti [43]:

- Coordination View, versione 2.0 (CV 2.0): è una MVD di IFC 2x3, il cui scopo è quello di garantire il coordinamento dei modelli disciplinari, in termini di visualizzazione e analisi di interferenze. Di conseguenza nei file IFC esportati o importati attraverso CV 2.0 non sono gestite le classi afferenti a tutti i domini specialistici (construction management, carichi strutturali, gestione dei costi, ecc.), alcune classi geometriche (il che potrebbe inibire alcuni utilizzi dei modelli) e i Quantity Set;
- Reference View (RV 1.2): è una MVD di IFC4, che eredita e introduce nuovi utilizzi rispetto alla precedente. Oltre a supportare il coordinamento dei modelli, visuale e computazionale per il controllo delle interferenze, rende possibile la costruzione di computi metrici e programmi operativi della costruzione. Pertanto tutti gli elementi sono rappresentati attraverso l'uso di superfici mesh e solidi di traslazione tali da garantire un'accurata rappresentazione dei volumi;
- Design Transfer View (DTV): è una MVD di IFC4 che si pone l'obiettivo di garantire, a differenza delle precedenti, il trasferimento delle informazioni di progetto da un software all'altro, rendendo possibile successive integrazioni e ampliamenti. Ciò è reso possibile dal supporto a rappresentazioni geometriche più avanzate rispetto a quelle previste dalle MVD precedenti.
- Reference View: è l'aggiornamento della RV 1.2 di IFC4 alla versione 4.3 dello schema.

Una volta esportati i modelli IFC con una delle configurazioni sopracitate, grazie a software quali BIMcollabZoom, BIM Vision, Solibri, usBIM.Viewer, solo per citarne alcuni, è possibile visualizzare e ispezionare gli elementi che li costituiscono.

Lo studio e la corretta comprensione degli scambi informativi rappresentano un aspetto centrale in un flusso di lavoro basato sul BIM, in particolare nell'ambito del recupero del patrimonio costruito, dove le figure coinvolte nel processo sono numerose e caratterizzate da competenze eterogenee [43].

1.3.4.2 IDS

L'Information Delivery Specification (IDS) è uno standard sviluppato da buildingSMART International, la cui versione 1.0 è stata approvata nel giugno 2024, finalizzato alla definizione dei requisiti informativi di un modello IFC.

A differenza dell'IFC, che definisce la struttura dei dati, l'IDS stabilisce quali informazioni devono essere presenti all'interno del modello e con quali caratteristiche. In questo senso, esso rappresenta uno strumento fondamentale per tradurre i requisiti informativi in regole verificabili.

Un IDS è un file con estensione *.ids*, strutturato in formato XML, che contiene un insieme di specifiche informative. Ciascuna specifica descrive un requisito che il modello IFC deve soddisfare; ad esempio, una specifica può indicare che tutte le entità *IfcWall* debbano essere dotate di una determinata proprietà di resistenza al fuoco. Gli autori dei modelli BIM possono utilizzare un file IDS come guida per assicurarsi che tutte le informazioni richieste siano correttamente incluse, mentre i destinatari del modello possono impiegarlo per verificare la conformità del modello IFC alle specifiche definite. È inoltre possibile generare report automatici che sintetizzano gli esiti dei controlli di conformità alle singole specifiche [44] (Fig. 1.21).

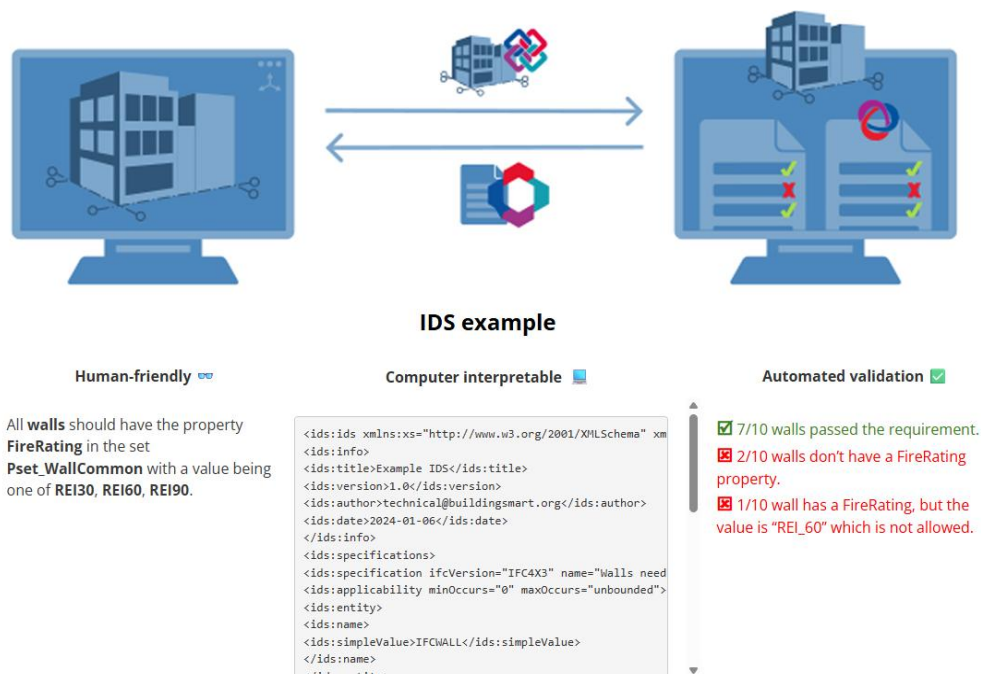
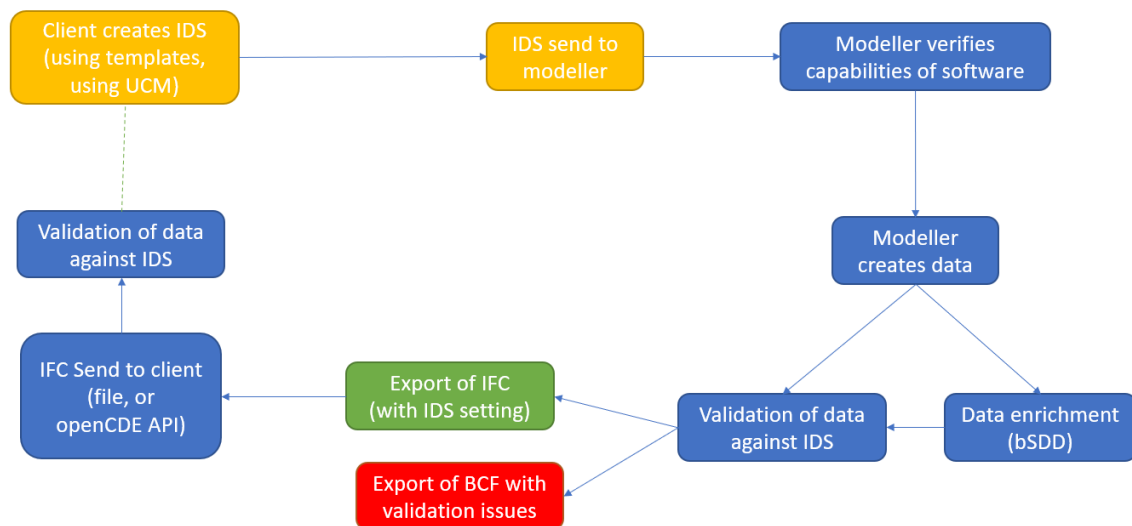


Fig. 1.21: IDS – Information Delivery Specification

L'IDS riveste pertanto un ruolo centrale nel workflow openBIM in quanto garantisce che, una volta validato, il modello IFC contenga tutte le specifiche richieste in fase di definizione dei requisiti informativi.

In Fig. 1.22 si può osservare uno schema tipico di flusso di lavoro comprendente l'IDS. In una prima fase, il committente o il soggetto responsabile definisce le specifiche all'interno del file IDS. Per la creazione del file può avvalersi di strumenti predefiniti quali l'Use Case Management (UCM), il quale permette di creare o riutilizzare casi d'uso predefiniti utili come base di partenza per la definizione del proprio IDS [45]. Attraverso software gratuiti, come usBIM.ids di ACCA Software [46], è quindi possibile personalizzare ogni specifica necessaria. Una volta completato il file IDS, questo può essere trasmesso ai soggetti incaricati della modellazione BIM, consentendo loro di avere già chiari nelle prime fasi della progettazione gli aspetti rilevanti e i vincoli da rispettare. Una volta completato il modello inizierà il processo di validazione dello stesso e, in caso di esito positivo, il file esportato IFC potrà essere condiviso con il gruppo di lavoro all'interno di un ambiente di condivisione dei dati, come ad esempio una piattaforma openCDE (Common Data Environment).

Qualora invece emergano errori o criticità da risolvere, come potrebbe essere la presenza di interferenze tra gli impianti evidenziata in fase di clash detection, si potrà ricorrere a un altro standard sviluppato da buildingSMART International, il BCF (BIM Collaboration Format) [47]. Questo standard consente a tutti gli attori coinvolti nel processo di interfacciarsi in maniera chiara e diretta riguardo alle problematiche emerse in validazione del modello in un unico ambiente condiviso.



©2020 buildingSMART International, Ltd., All Rights Reserved



Fig. 1.22: IDS – Flusso di validazione IFC (fonte: buildingSMART International)

1.3.4.3 bSDD

Tra gli strumenti openBIM in corso di sviluppo da parte di buildingSMART International, finalizzati all'ottimizzazione dei processi di scambio di informazioni tra modelli, rientra il dizionario di dati bSDD (buildingSMART Data Dictionary) [48].

Il buildingSMART Data Dictionary è definito come *“an online platform for storing data dictionaries. It allows free publication and access to dictionaries by extending the global IFC schema with its own industry (architecture, engineering, construction, and operations—AECO) classifications and locally required parameters”* [49].

Il database indica quindi in modo univoco quali serie di proprietà sono necessarie per ogni tipo di prodotto e come queste vengono definite, eliminando così possibili ambiguità e incomprensioni tra le organizzazioni coinvolte nel processo (Fig. 1.23).

Il bSDD si integra in modo naturale all'interno del workflow openBIM descritto in precedenza, in particolare in relazione allo standard IDS. Ad esempio, un'organizzazione può imporre, come requisito per l'approvazione del modello, l'utilizzo di uno specifico dizionario di dati in quanto ritenuto quello più idoneo al progetto (o che potrebbe essere stato pubblicato appositamente per esso) in modo da garantire l'adozione di determinate classi e proprietà desiderate. Una volta completata la modellazione, l'IDS consente di verificare se il dizionario è stato effettivamente utilizzato o meno all'interno del modello IFC.

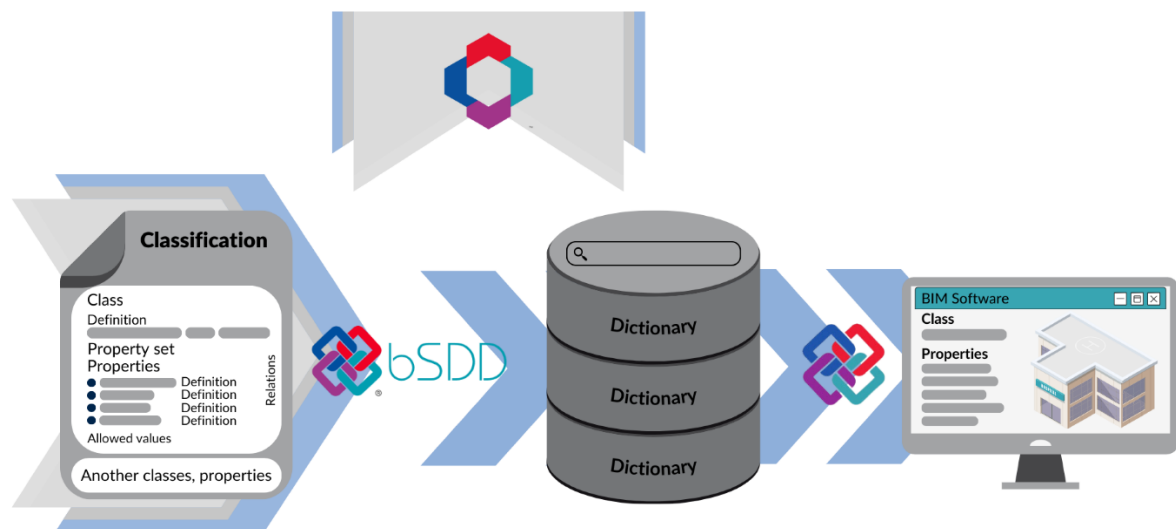


Fig. 1.23: bSDD – buildingSMART Data Dictionary (fonte: Kladz et al., 2025)

Il bSDD si basa sui principi definiti da tre norme internazionali:

- ISO 12006-3:2022 – Framework for object-oriented information: definisce il quadro di riferimento per la gestione delle informazioni orientate agli oggetti, introducendo il concetto di data dictionary;
- ISO 23386:2020 – Methodology for properties in interconnected data dictionaries: stabilisce come creare, descrivere e mantenere le proprietà nei dizionari di dati interconnessi;
- ISO 23387:2020 – Data templates for construction objects: definisce come strutturare i modelli di dati per gli oggetti da costruzione.

Questa organizzazione standardizzata dei dizionari consente agli utenti di scambiare dati basati su una struttura comune, riutilizzare contenuti esistenti, mappare contenuti su altri dizionari e mostrare la relazione tra diverse classificazioni o termini [50].

Un altro concetto importante dei dizionari è quello relativo alla possibilità di renderli disponibili in più lingue. Tale caratteristica ne favorisce l'utilizzo nei progetti internazionali, dove, nonostante le barriere linguistiche, ogni partecipante al processo di costruzione ha una chiara definizione della classificazione scelta. Ciò rappresenta anche un'opportunità per implementare un dizionario esistente in progetti nazionali, dopo la sua traduzione e contestualizzazione. I dizionari possono essere inoltre pubblicati e utilizzati da chiunque, sia

da enti a livello internazionale sia da singoli utenti, tramite il portale di buildingSMART International (Fig. 1.24). All'interno di ciascun dizionario si possono definire le varie classi, proprietà (con eventualmente i relativi valori accettati come, ad esempio, i valori limite previsti dalle normative per quanto riguarda le trasmittanze termiche degli elementi opachi di un edificio) e relazioni con i propri identificativi unici (URI). In questo modo è possibile associare la stessa proprietà comune a più classi, evitando così il proliferare di Property Set personalizzati e riducendo la frammentazione dei dati.

All'interno dello schema IFC infatti, è impraticabile avere tutte le classi appartenenti al mondo dell'AEC, in quanto esso copre una moltitudine di casistiche peculiari e diversificate tra loro. Il rischio, in assenza di un sistema condiviso di riferimento, è quindi quello di assistere alla creazione di un eccessivo numero di Property Set personalizzati e difficilmente interoperabili. Grazie al bSDD invece, è possibile raccogliere classi e proprietà in modo ordinato, definito e accessibile a chiunque. Ciò lo rende quindi uno strumento imprescindibile per la condivisione delle informazioni in ambito openBIM.

buildingSMART Italy ... > Sistemi fissi automa... > 1.1

Dictionary

Sistemi fissi automatici di rivelazione e di segnalazione allarme di incendio

Organization
buildingSMART Italy - IBIMI

License
No license (rights reserved)

Version 1.1 Active

Version history

Dictionary

Italian Change request

Name
Sistemi fissi automatici di rivelazione e di segnalazione allarme di incendio

Dictionary code
bSitalyIRAI

Version
1.1

Identifier (URI)
<https://identifier.buildingsmart.org/uri/bSitaly/bSitalyIRAI/1.1> Copy

More info
<https://www.buildingsmartitalia.org/utenti/pubblicazioni/openbim-modellazione-irai/>

Organization
buildingSMART Italy - IBIMI

Organization code
bSitaly Show more

Classes (25) Filter classes

Name	Code	Definition	Identifier (URI)
Dispositivo di segnalazione	ALARM		
Pulsante di segnalazione manuale	ALARM-BUTTON		
Spia di segnalazione	ALARM-LIGHT		
Dispositivo di allarme antincendio	ALARM-SIREN		
Avvisatore luminoso	ALARM-VAD		
Dispositivo di allarme ottico/acustico	ALARM-VAD_AC		
Rivelatori	DETECTOR		
Rivelatore di calore a gradiente di temperatura	DETECTOR-DYNAM IC_HEAT		
Rivelatore di fiamma a infrarossi	DETECTOR-IR_FLAME	Rivelatore di fiamma che risponde solo a radiazione con lunghezza d'onda maggiore di 850 nm	
Rivelatore lineare che utilizza un raggio ottico	DETECTOR-LINE_S MOKE		

Copyright © 2025 buildingSMART All Rights Reserved | bSDD | Privacy and Cookie Statement | Terms and Conditions | Tech updates forum

Fig. 1.24: Esempio di dizionario bSDD (fonte: buildingSMART International)

Dal punto di vista tecnico, i dizionari bSDD si basano su file strutturati in formato JSON (JavaScript Object Notation). Tuttavia, non sono necessarie competenze di programmazione per la loro creazione. Attraverso piattaforme dedicate come quelle sviluppate da ACCA Software, e in particolare mediante il servizio gratuito usBIM.bSDDeditor [51], è possibile creare dizionari in modo guidato, compilando classi, proprietà e relativi valori in modo rapido

e intuitivo (Fig. 1.25). In alternativa, una volta compresa la struttura del file JSON, il dizionario può essere modificato manualmente all'interno di un qualsiasi editor di codice gratuito, come ad esempio Visual Studio Code.

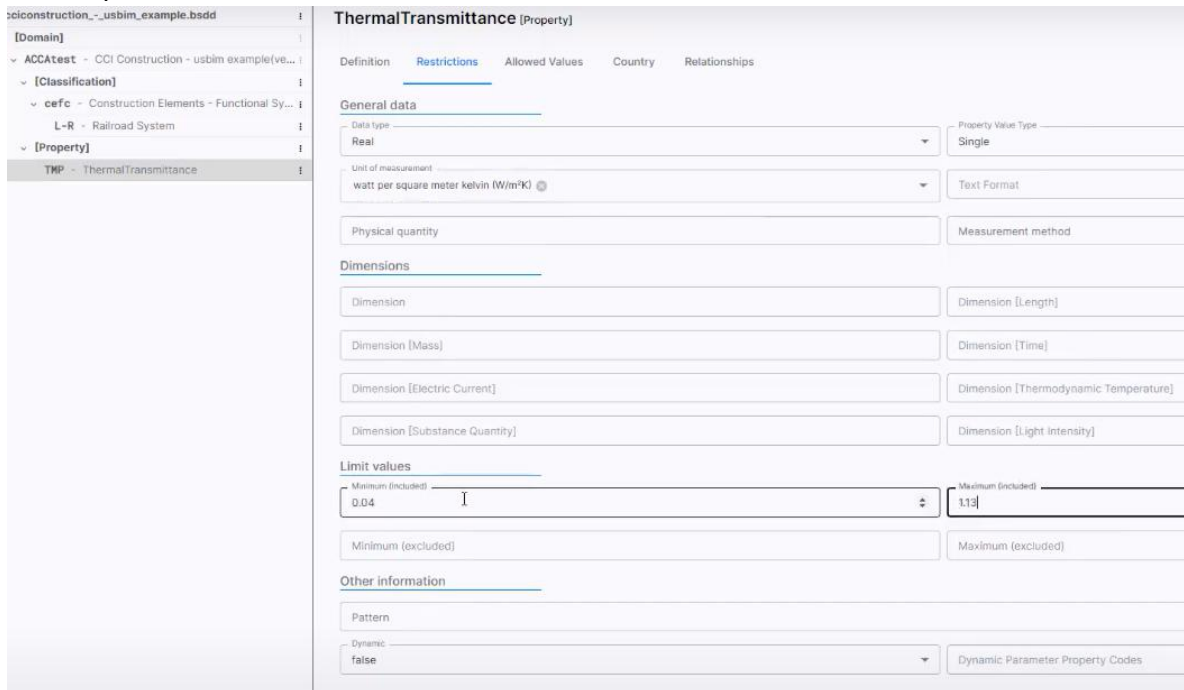


Fig. 1.25: usBIM.bSDDeditor (fonte: ACCA Software)

Una volta creato il dizionario è possibile utilizzare software freeware come usBIM.bSDD di ACCA Software (Fig. 1.26), o altri strumenti analoghi e open source come Blender, mediante il tool Bonsai che verrà approfondito nel paragrafo 1.3.8.2, per l'associazione delle classi e delle relative proprietà appartenenti al dizionario direttamente agli elementi che costituiscono il modello IFC.



Fig. 1.26: usBIM.browser (fonte: ACCA Software)

1.3.5 Internet of Things

Con Internet of Things (IoT) si intende *“the interconnection of sensing and actuating devices providing the ability to share information across platforms through a unified framework, developing a common operating picture for enabling innovative applications. This is achieved by seamless ubiquitous sensing, data analytics and information representation with Cloud computing as the unifying framework”* [52].

L'IoT consente la raccolta dei dati necessari per la realizzazione dei Digital Twin, ovvero i gemelli digitali degli asset fisici, che verranno approfonditi nel paragrafo successivo 1.3.6.

Grazie ai sensori IoT è quindi possibile monitorare ogni singolo aspetto legato alle prestazioni dell'edificio e allo stato dei suoi ambienti, come ad esempio la temperatura dei locali, il livello di salubrità dell'aria e la concentrazione di CO₂, i consumi dei dispositivi operanti al suo interno, ecc.

Il termine Internet of Things, inteso come l'insieme di dispositivi fisici collegati a una rete Internet e comunicanti con essa per la raccolta e condivisione di dati, fu coniato da Kevin Ashton nel 1999 [53], anche se l'utilizzo di questo tipo di tecnologia risale a periodi precedenti. Uno dei primi esempi di IoT risale infatti ai primi anni Ottanta e riguarda un distributore di Coca-Cola situato presso la Carnegie Mellon University a Pittsburgh, Pennsylvania. Grazie alla sensoristica installata all'interno del distributore, i programmatori locali si potevano collegare tramite internet all'apparecchio refrigerato per controllare la disponibilità delle bevande e la loro temperatura [54].

Si tratta dunque di una tecnologia in sviluppo da diversi decenni, la cui applicazione in ambito edilizio ha iniziato a diffondersi in modo sistematico solo in tempi più recenti, inizialmente nel monitoraggio delle opere strutturali [55] e successivamente negli aspetti legati al comfort e alla sicurezza degli ambienti interni degli edifici [56].

L'IoT risulta particolarmente rilevante per il patrimonio edilizio esistente e storico in quanto consente un monitoraggio continuo, non invasivo e ad alta risoluzione delle condizioni ambientali e strutturali (Fig. 1.27). Tali capacità supportano sia le strategie di conservazione preventiva sia la gestione sostenibile, poiché permettono di raccogliere dati in tempo reale, anticipando l'individuazione di fenomeni di degrado e ottimizzando gli interventi di manutenzione.



Fig. 1.27: Dashboard IoT (fonte: Arduino Store)

Un sistema IoT è costituito da varie componenti connesse tra loro, nello specifico possiamo trovare:

- **Sensori:** rappresentano il cuore delle architetture IoT. Sono i dispositivi che rilevano variabili fisiche o ambientali (ad es. sensori DHT22 per rilevare temperatura e umidità, ADXL345 per le vibrazioni, Sensirion SCD30 per la concentrazione di CO₂, BH1750 per l'illuminamento) e le trasformano in dati digitali;
- **Attuatori:** dispositivi che permettono di agire sull'ambiente in base ai dati ricevuti dai sensori o da algoritmi di controllo per regolare, ad esempio, ventilazione, illuminazione, ecc. Abilitano il concetto di Digital Twin (monitoraggio e controllo);
- **Microcontrollori e piattaforme di prototipazione:** consentono di acquisire i dati dai sensori, eseguire un primo livello di elaborazione e inviare le informazioni ai sistemi di raccolta o ai servizi cloud. Tra i più diffusi troviamo Arduino, microcontrollore open source molto utilizzato per la sua semplicità di configurazione, Raspberry Pi, più adatto a progetti che richiedono maggiore potenza di calcolo, come edge computing, machine learning leggero e gestione di database locali e infine ESP32, microcontrollori a basso costo con Wi-Fi e Bluetooth integrati;
- **Gateway e connettività:** rappresentano il ponte di comunicazione tra i dispositivi IoT (sensori e attuatori) e la rete di trasmissione. Tra le tecnologie maggiormente utilizzate troviamo Wi-Fi (alta velocità, ma consumo energetico elevato, utile in edifici con alimentazione stabile), Zigbee (basso consumo, reti mesh, ideale per monitoraggi indoor distribuiti), e NB-IoT / 5G (connettività cellulare, adatto per dispositivi in aree senza Wi-Fi);
- **Protocolli di comunicazione:** definiscono il modo in cui i dispositivi IoT scambiano dati. Un protocollo molto diffuso nel campo dell'IoT è rappresentato dal MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), progettato come un trasporto di messaggistica publish/subscribe estremamente leggero che si presenta come ideale per collegare dispositivi remoti con un'impronta di codice ridotta e una larghezza di banda di rete minima. Altro protocollo diffuso è il LoRaWAN che presenta una bassa velocità ma lunga portata, fino a diversi chilometri, e basso consumo. Ciò lo rende adatto a edifici sparsi o con vincoli di accesso. Infine, troviamo l'HTTP/HTTPS ampiamente supportato e di facile utilizzo nell'ambito delle comunicazioni API web dei dispositivi connessi;
- **Piattaforme di raccolta dati:** i dati possono essere gestiti e archiviati in diverse piattaforme. Ad esempio tra le piattaforme Cloud troviamo AWS IoT di Amazon, Azure IoT Hub di Microsoft, Google IoT Core. Esse garantiscono scalabilità, analisi avanzata, e possibilità di utilizzare i dati nell'ambito del machine learning. A fronte di questa grande versatilità si contrappone però una notevole difficoltà nelle configurazioni dei vari plug-in (si veda l'approfondimento di paragrafo 1.3.7.3 con illustrato il collegamento Azure-Tandem), oltre che il vincolo di dover sottoscrivere diversi abbonamenti in base al numero di scambi di dati, limitando di fatto la diffusione di questo tipo di piattaforme.
Altre piattaforme di raccolta dati possono essere quelle basate su database locali, tra i più diffusi troviamo SQLite, PostgreSQL, InfluxDB, più adatti in contesti HBIM dove la sovranità del dato è critica (es. archivi museali).

Il linguaggio SQL (Structured Query Language) è uno standard per la gestione e l'interrogazione di database relazionali e viene utilizzato per creare, modificare, gestire e

interrogare i dati contenuti in database strutturati secondo il modello relazionale. In ambito IoT, SQL consente la gestione strutturata dei dati provenienti dai sensori, supportando operazioni di raccolta, interrogazione e analisi all'interno di database relazionali.

In funzione delle esigenze di complessità, prestazioni e leggerezza del sistema, possono essere adottate diverse soluzioni di database, quali MySQL, PostgreSQL o SQLite. In particolare, nel presente lavoro è stato utilizzato SQLite, in quanto non richiede la configurazione di un server dedicato, memorizza l'intero database in un unico file locale ed è una soluzione open source a basso impatto sulle risorse di sistema.

Tali caratteristiche lo rendono particolarmente adatto a contesti IoT e a sistemi di monitoraggio leggeri.

Le diverse componenti descritte costituiscono l'architettura dei sistemi IoT, la cui configurazione può variare a seconda dell'utilizzo che se ne intende fare e delle tecnologie di base impiegate. Non esiste infatti una soluzione unica, ma questa può variare in base al dominio specifico di applicazione. Ad esempio, le architetture RFID (Radio-Frequency Identification) si concentrano sull'identificazione univoca e sulla tracciabilità di oggetti connessi utilizzando la tecnologia RFID, con l'obiettivo di migliorare la visibilità degli oggetti, in particolare la loro posizione e il loro stato.

Altra architettura largamente utilizzata è quella per la gestione della Catena di Approvvigionamento (Supply Chain Management - SCM), la quale mira a migliorare l'efficienza e la visibilità delle catene di approvvigionamento e dei processi industriali.

Per quanto riguarda la tipologia di architettura più vicina al tema trattato nella presente ricerca, ovvero quella relativa al monitoraggio delle condizioni ambientali all'interno degli edifici storici, si può fare riferimento alle Reti di Sensori Wireless (Wireless Sensor Network - WSN) specificamente progettate per la raccolta e il monitoraggio di dati ambientali e fisici attraverso un gran numero di nodi sensore distribuiti. Questi nodi sono tipicamente di piccole dimensioni, a basso costo e a basso consumo energetico, rendendoli ideali per essere posizionati in vari punti all'interno di un edificio per rilevare parametri come temperatura e umidità [57]. L'architettura IoT considerata basilare e punto di partenza per successive implementazioni è quella denominata a tre livelli [58] (Fig. 1.28):

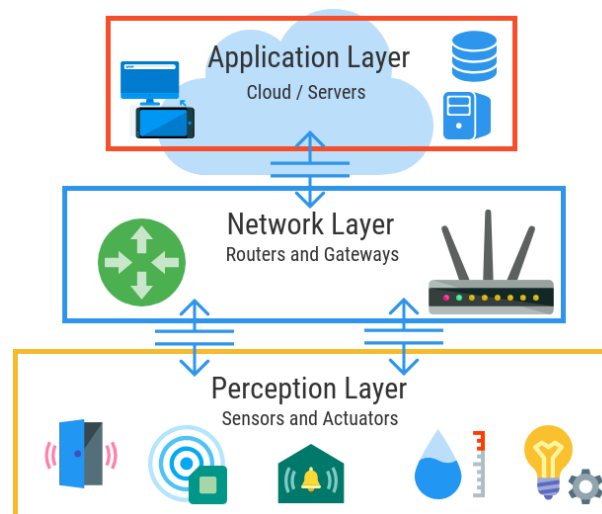


Fig. 1.28: Architettura IoT a tre livelli (fonte: M.Peddolla, 2021)

- Perception Layer (Sensori per la raccolta dati e attuatori): Questo layer è presente in tutte le architetture IoT, poiché si occupa dell'interazione con il mondo fisico attraverso sensori per raccogliere dati ambientali, fisici o di altro tipo;
- Network Layer (Comunicazione dati): La trasmissione dei dati raccolti è un aspetto cruciale. Questo layer gestisce la connettività tra i dispositivi IoT, le reti e i server remoti o il cloud. Diverse tecnologie di comunicazione (Wi-Fi, Bluetooth, LoRaWAN, reti cellulari, Protocolli MQTT) operano a questo livello. Architetture basate su WSN, cloud, e fog computing evidenziano l'importanza di questo layer;
- Application Layer (Visualizzazione, controllo): Questo è il layer più vicino all'utente, dove i dati elaborati vengono presentati, visualizzati e utilizzati per il controllo e il monitoraggio IoT. Le applicazioni in vari domini (Smart City, sanità, agricoltura, ecc.) risiedono in questo layer.

Sulla base di questa architettura a tre livelli, è possibile effettuare delle implementazioni a seconda degli scopi e della complessità richiesta. Nel caso, ad esempio, in cui vi sia la necessità di elaborare i dati raccolti, quindi non solo visualizzarli, è necessario introdurre un layer denominato Middleware / Processing Layer.

Questo layer può includere funzionalità di filtraggio, aggregazione, analisi (anche tramite cloud computing o fog computing), gestione dei dispositivi e fornitura di servizi. Le architetture SOA (Service Oriented Architecture), quelle che sfruttano il cloud, il fog computing e quelle per la gestione di Big Data hanno un forte focus su questo layer.

Un altro layer trasversale a tutte le tipologie di architetture IoT è il Security Layer. La sicurezza, infatti, come ad esempio l'autenticazione, l'autorizzazione, la privacy e l'integrità dei dati è una priorità che deve essere considerata in tutte le architetture IoT.

1.3.6 Digital Twin

Nell'ambito della presente ricerca l'attenzione si concentra su come la tecnologia IoT, integrata nei modelli BIM al fine di generare i Digital Twin (Fig. 1.29), ovvero i gemelli digitali degli edifici, abbia particolare rilevanza nel contesto degli edifici storici.

Come anticipato nel paragrafo precedente, tali sistemi consentono di visualizzare da remoto informazioni relative allo stato dell'edificio monitorato, comprendendo le condizioni ambientali dei singoli locali, le prestazioni delle componenti impiantistiche, i relativi consumi energetici, ecc.

Oltre alla visualizzazione dei dati, un Digital Twin può abilitare operazioni di controllo da remoto quali, ad esempio, l'apertura o la chiusura automatizzata dei serramenti in caso di rilevamenti di CO₂ oltre i valori soglia impostati, la regolazione dei termostati collocati all'interno dei locali, l'attivazione dei sistemi di sicurezza, e altre azioni analoghe.

È inoltre possibile, grazie al machine learning, prevedere guasti alle componenti impiantistiche degli edifici e segnalare con largo anticipo la necessità di sostituzione di elementi, riducendo così i tempi di fermo degli apparati, solo per citare alcuni possibili utilizzi.

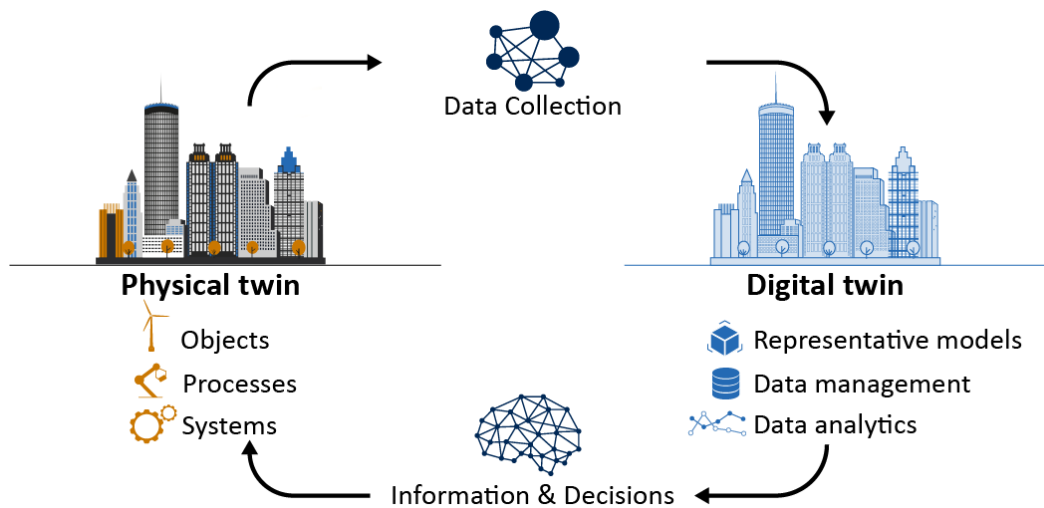


Fig. 1.29: Digital Twin (fonte: www.gao.gov/products/gao-23-106453)

Negli ultimi anni, l'applicazione del concetto di Digital Twin in combinazione con il BIM ha registrato una rapida diffusione, accompagnata da sviluppi continui. Ciò è testimoniato sia dall'aumento delle pubblicazioni scientifiche (fonte Scopus, Query: TITLE-ABS-KEY ("digital twin" AND iot AND bim) AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2025), Fig. 1.30, sia da report di mercato come quello condotto nel 2022 dalla Gartner Inc. [59], e richiamato dallo studio di Attaran del 2023 [60]. Tale indagine evidenzia un progressivo ingresso dei Digital Twin nell'uso comune delle organizzazioni e stima che entro il 2027 oltre il 40% delle grandi aziende a livello globale adotterà questo tipo di soluzioni nei propri progetti con finalità di incremento dei ricavi. Lo studio di Attaran richiama inoltre ulteriori report, come quello realizzato da Global Market Insight, secondo cui il mercato dei Digital Twin, stimato nel 2022 in circa 8 miliardi di dollari, dovrebbe crescere con un tasso annuo composto (CAGR) di circa il 25% nel periodo 2023 - 2032 [61]. Infine, secondo un altro recente rapporto di Technavio, azienda leader nelle ricerche di mercato con copertura globale, questo mercato è destinato a crescere di quasi 164 miliardi di dollari tra il 2024 e il 2029 [62].

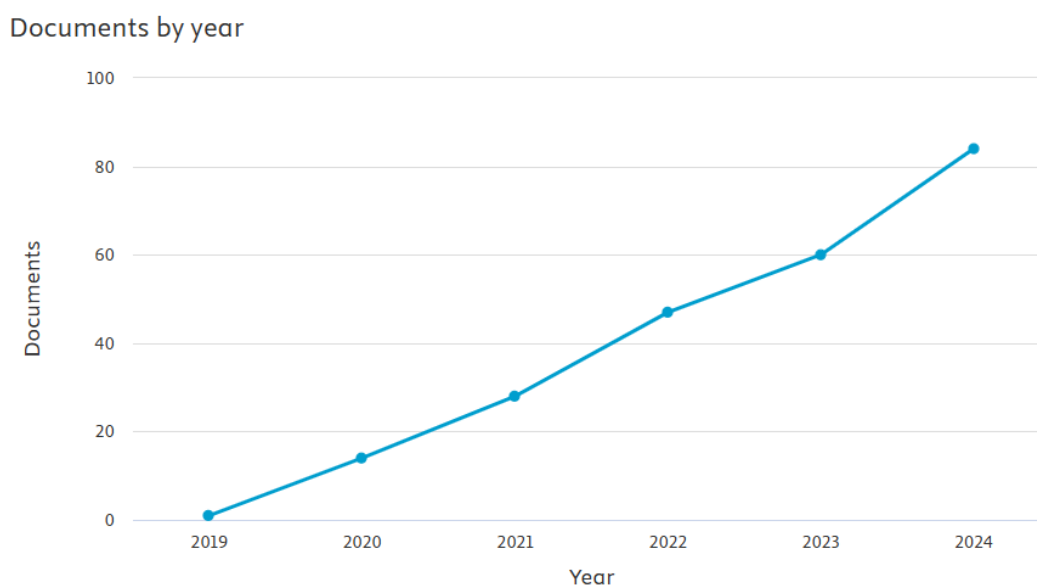


Fig. 1.30: Andamento pubblicazioni Digital Twin - BIM - IoT (fonte: Scopus)

I report sopracitati testimoniano come queste tecnologie siano fortemente proiettate verso il futuro; tuttavia, il concetto di gemello digitale presenta una storia più lunga di quanto suggerisca la recente diffusione del termine.

Il suo primo utilizzo, nonostante non fosse formalmente ancora noto come Digital Twin, è infatti spesso associato alla missione NASA del 1970 Apollo 13 nella quale gli astronauti, a seguito di una grave esplosione a bordo, furono tratti in salvo grazie anche all'utilizzo di simulatori a terra che riproducevano esattamente le condizioni presenti in tempo reale nello spazio [63].

Negli anni Ottanta e Novanta, grazie all'evoluzione dei software visti in precedenza e delle tecnologie legate alla sensoristica, PLC e reti di comunicazione industriale, iniziano ad emergere i primi sistemi cyber-fisici, in cui la componente virtuale interagiva con quella reale, seppur in modo ancora limitato e non bidirezionale. Tali sistemi trovarono ampio utilizzo soprattutto in campo energetico e aerospaziale [64] (Fig. 1.31), aprendo la strada alla sperimentazione dell'uso di simulatori collegati a dati reali per la manutenzione predittiva.

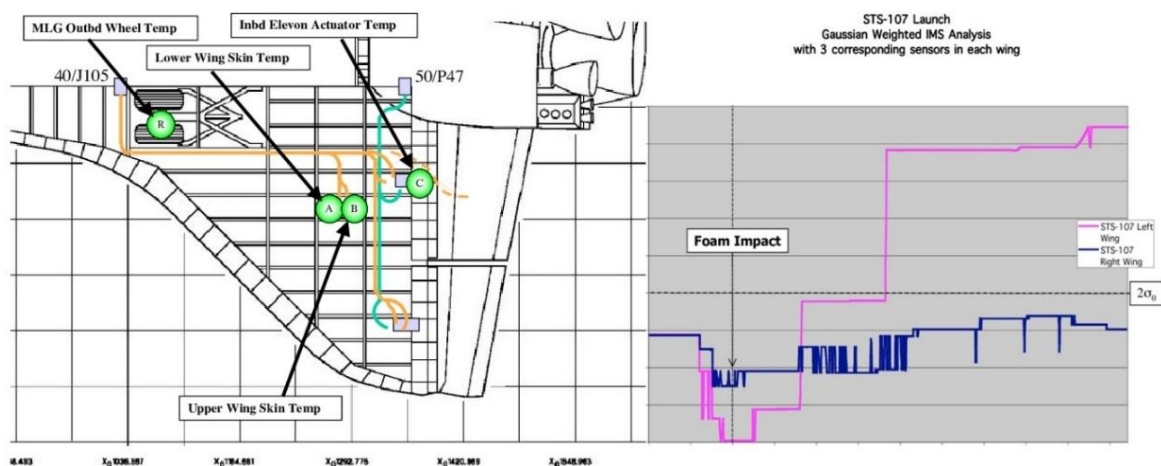


Fig. 1.31: Sensori di temperatura utilizzati sullo Space Shuttle (fonte: Iverson D., 2008)

Parallelamente, nel 1991, l'ingegnere informatico della Yale University David Gelernter, introdusse il concetto di Mirror Worlds [65], anticipando l'idea di un mondo digitale in grado di rispecchiare quello fisico. Questi sviluppi prepararono il terreno alla formalizzazione della definizione di Digital Twin da parte del professore dell'Università del Michigan Michael Grieves, il quale introdusse il concetto di gemelli digitali in un corso sulla gestione del ciclo di vita del prodotto (Product Lifecycle Management – PLM) definendolo come *“una rappresentazione virtuale di un prodotto fisico, collegata al suo corrispondente reale attraverso flussi di dati bidirezionali”* [66]. Sebbene non si parli ancora espressamente di applicazioni in edilizia, il lavoro di Grieves fa una panoramica sulla grande versatilità di questi sistemi ed enfatizza l'importanza del corretto flusso di dati tra oggetto fisico e controparte virtuale. Il modo in cui vengono scambiate le informazioni determina infatti il livello di integrazione tra l'oggetto reale e il corrispondente virtuale [67]. Nello specifico possiamo trovare tre configurazioni che danno origine ad altrettante definizioni, ognuna con le proprie caratteristiche (Fig. 1.32):

- Digital Model: rappresentazione digitale di un asset fisico (preesistente o progettato) senza scambio automatico di dati. Le modifiche dell'asset reale non aggiornano automaticamente il modello digitale e viceversa;
- Digital Shadow: rappresentazione digitale con flusso unidirezionale dall'asset fisico al modello. Le variazioni nello stato dell'asset reale aggiornano la controparte digitale, ma non è previsto un controllo dal digitale verso il fisico. Un tipico esempio può essere quello di un edificio i cui ambienti interni sono monitorati tramite sensori di temperatura e umidità. Tramite il modello è possibile interrogare i dati ma non vi è la possibilità di intervenire direttamente, ad esempio alzando o abbassando la temperatura;
- Digital Twin: i dati fluiscono tra un oggetto fisico esistente e un oggetto digitale e sono completamente integrati in entrambe le direzioni. Una modifica apportata all'oggetto fisico porta automaticamente a una modifica dell'oggetto digitale e viceversa. Nell'esempio precedente, l'utente può intervenire sull'oggetto fisico tramite il modello, andando a regolare i termostati da remoto.

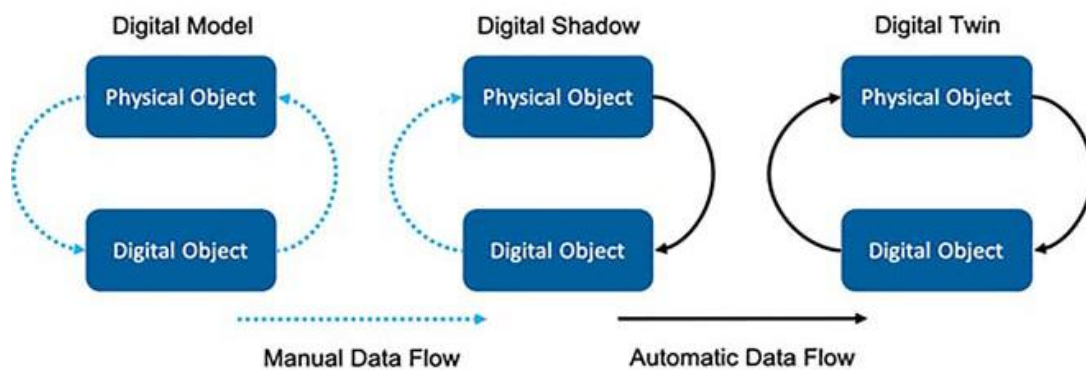


Fig. 1.32: Livelli di integrazione da Digital Model a Digital Twin (fonte: adattamento dell'autore da Fuller et al., 2020)

Con lo sviluppo delle applicazioni BIM al patrimonio storico, (Heritage Building Information Modeling, paragrafo 1.3.3), è emersa con maggiore chiarezza l'importanza di questi strumenti per la conoscenza, la gestione e la conservazione dei manufatti.

Per quanto riguarda lo stream di dati finalizzato agli aspetti di monitoraggio e prevenzione, solo a partire dal 2019 troviamo i primi studi inerenti l'IoT applicato all'HBIM [68], grazie ai quali è stata aperta la strada all'applicazione del concetto di Digital Twin anche in questo ambito.

L'installazione di sensori all'interno degli ambienti da monitorare consente ai gestori dei luoghi di individuare possibili minacce all'integrità degli oggetti, suggerendo azioni preventive da intraprendere per proteggerli e valutando l'impatto di ogni soluzione proposta su aspetti quali budget, sostenibilità, valore culturale e vincoli normativi.

Inoltre, nel lungo periodo, il monitoraggio e l'archiviazione dei dati provenienti dai sensori possono favorire una migliore comprensione del comportamento degli edifici e consentire valutazioni sull'effettiva efficacia delle soluzioni implementate (Fig. 1.33).

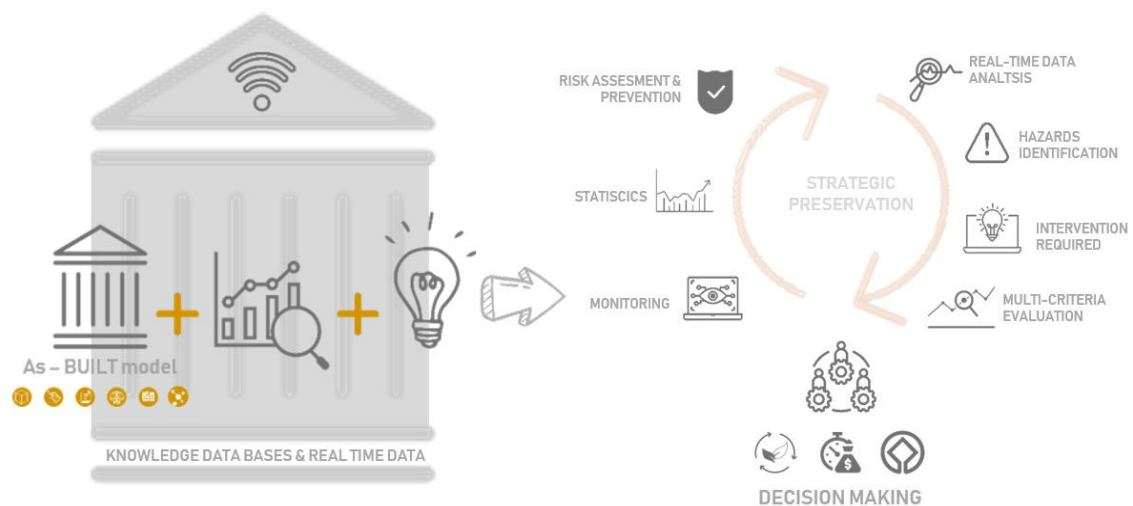


Fig. 1.33: Digital Twin a supporto dei processi decisionali per la conservazione dei beni (fonte: Jouan et al., 2019)

Nel contesto del patrimonio storico, l'efficienza energetica assume un ruolo primario con l'obiettivo di ridurre i consumi, migliorare il comfort percepito dagli utenti e preservare al contempo i valori del patrimonio [69].

Una delle sfide maggiori è rappresentata dal dover operare all'interno di edifici con gradi di vincolo che ne limitano la libertà di intervento per quanto riguarda la progettazione e l'installazione di impianti e strumentazioni di rilevamento, a differenza di quanto avviene negli edifici di nuova costruzione.

In tale prospettiva sono sempre più numerosi i lavori che propongono casi studio nei quali vengono testate queste tecnologie in ambienti vincolati. Ad esempio, all'interno di un edificio storico in cui l'installazione della ventilazione meccanica non era praticabile, Silva e Henriques [70] hanno proposto di limitare il numero di visitatori monitorando la concentrazione di CO₂ degli ambienti interni e regolando gli accessi in funzione di soglie predefinite (Fig. 1.34).

Un ulteriore studio del 2024 condotto da Ni et al. [71] si concentra sul problema del deterioramento delle opere collocate all'interno del castello di Löstad, in Svezia, attribuito a condizioni microclimatiche interne inadeguate. Per risolvere questo problema sono stati innanzitutto installati una serie di sensori in tutto l'edificio principale, per monitorare continuamente vari parametri ambientali interni. I risultati hanno rivelato la presenza di una fonte di umidità proveniente dal seminterrato che interessava anche le stanze dei piani superiori, in particolare il piano terra, e comportava il rischio di formazione di muffe e di deterioramento dei materiali a causa dei cicli di sollecitazione. Si è anche scoperto che l'attuale ventilazione naturale non era in grado di gestire adeguatamente la qualità dell'aria interna durante le giornate con un grande numero di visitatori. I risultati hanno suggerito l'adozione di misure come l'installazione di barriere al vapore per risolvere i problemi di umidità nel seminterrato e al piano terra, mitigando così i rischi come la crescita di muffa e il deterioramento dei materiali. Inoltre, sono state suggerite strategie di riscaldamento ad alta efficienza energetica per i piani superiori.

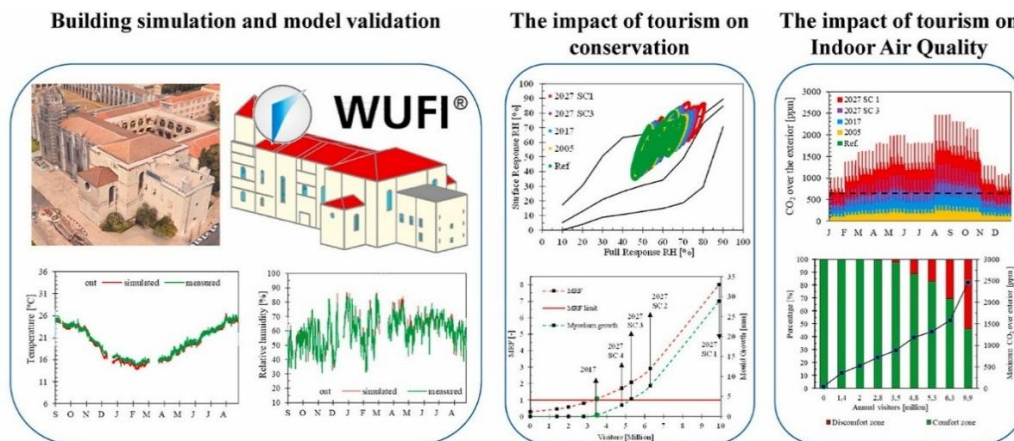


Fig. 1.34: Impatto del turismo sulla conservazione e sulla qualità dell'aria interna (fonte: Silva et al., 2021)

Gli esempi sopracitati mostrano come le soluzioni adottate siano implementabili, scalabili ed efficaci sia che si tratti di monitorare edifici di nuova realizzazione sia edifici storici. Va tuttavia evidenziato che, al di fuori della ricerca accademica, permangono difficoltà significative nell'adozione estesa di queste tecnologie. Lo studio di Opoku et al. del 2021 [72], ad esempio, evidenzia come sebbene l'applicazione del Digital Twin stia migliorando molteplici settori produttivi, il suo sviluppo nell'industria delle costruzioni risulta ancora in una fase relativamente iniziale, richiedendo un cambiamento culturale e organizzativo per cogliere pienamente le opportunità offerte.

Per quanto riguarda la maggior parte degli approcci HBIM contemporanei, questi sono prevalentemente orientati alla documentazione, all'analisi strutturale e alla pianificazione basata su dati statici o periodicamente aggiornati. Di conseguenza, il monitoraggio delle condizioni si basa spesso sulle ispezioni manuali, sui rilievi periodici o sui risultati delle simulazioni piuttosto che sugli input dei sensori in tempo reale [73].

Le ragioni tecniche di questa limitazione possono essere dovute a vari fattori:

- Complessità dell'integrazione dei dati: l'integrazione di flussi di dati eterogenei dei sensori nei modelli HBIM presenta delle sfide tecniche considerevoli. Stabilire un'interfaccia ottimale tra le uscite dei dispositivi IoT (sensori di temperatura, umidità, estensimetri, ecc.) e le piattaforme BIM (sia proprietarie, come ad esempio Autodesk Tandem, che open source) richiede interfacce e un middleware dedicati, nonché competenze specifiche, con ulteriori complessità legate alla gestione di database differenti e alla necessità di standard informativi rigorosi per evitare discrepanze o sovraccarico informativo;
- Lacune nella standardizzazione: mancano standard maturi e universalmente accettati per incorporare i dati dei sensori in tempo reale negli ambienti HBIM, in particolare per le applicazioni del patrimonio culturale, dove le soluzioni disponibili spesso non sono in grado di rispondere adeguatamente alle caratteristiche e ai requisiti unici degli edifici storici;
- Vincoli degli edifici storici: l'adeguamento di strutture secolari con reti di sensori può sollevare preoccupazioni per quanto riguarda l'invasività, l'impatto estetico e la manutenzione, limitando l'impiego di sensori in tempo reale su larga scala o in modo continuo, soprattutto in siti sensibili o altamente protetti.

Nonostante tali sfide, alcuni progetti e ricerche recenti hanno sperimentato con successo l'integrazione in tempo reale, collegando sensori ambientali o strutturali ai modelli BIM/HBIM

per monitorare da remoto comportamenti come la deflessione di travi ed elementi strutturali [74], il comfort percepito all'interno degli ambienti [75] o il flusso di visitatori nei musei [76]. Al fine di favorire la diffusione dei Digital Twin nel settore delle costruzioni, risulta necessario dimostrarne l'accessibilità e le potenzialità, sia nei confronti dei soggetti coinvolti nella realizzazione e nella gestione delle opere sia degli utenti finali. Occorre infatti considerare che quest'ultimi non sono necessariamente professionisti del settore e, provenendo da ambiti disciplinari differenti, come ad esempio quello museale, possono incontrare difficoltà nell'utilizzo di software e piattaforme complesse da configurare.

In contesti come quello museale la consultazione di informazioni attraverso strumenti semplici e immediati rappresenta un primo passo verso l'adozione di sistemi di supporto alle decisioni basati su modelli informativi. In tale direzione, la presente ricerca intende illustrare un flusso di lavoro che consenta di visualizzare in modo agevole dati relativi alle prestazioni termiche e alle condizioni microclimatiche degli edifici storici direttamente all'interno dei modelli BIM.

Nel paragrafo seguente (1.3.7) vengono illustrate le principali piattaforme oggi disponibili per la visualizzazione dello stream di dati, così da offrire una panoramica delle soluzioni presenti sul mercato.

1.3.7 Piattaforme per la visualizzazione dello stream di dati

La visualizzazione dello stream di dati può avvenire attraverso modalità e strumenti molto diversi, che spaziano dalla rappresentazione bidimensionale (grafici, dashboard interattive) fino a soluzioni tridimensionali integrate con modelli digitali. La scelta della piattaforma più idonea dipende da molteplici fattori, tra cui il livello di dettaglio richiesto, il tipo di utenza coinvolta, il contesto applicativo e i costi di implementazione e gestione.

Come verrà approfondito nei paragrafi successivi, è possibile individuare sia soluzioni basate su piattaforme cloud consolidate, spesso collegate a software proprietari per la visualizzazione dei dati nei modelli IFC (come nel caso di Microsoft Azure e Autodesk Tandem), sia approcci che prevedono un utilizzo misto di software proprietari e strumenti open source (come Autodesk Revit e Dynamo). Parallelamente, la letteratura più recente propone anche alternative interamente freeware e open source, basate sulla realizzazione di piattaforme di visualizzazione personalizzate e indipendenti da ecosistemi proprietari (si veda Tab. 1.3).

1.3.7.1 Arduino Cloud IoT

Arduino IoT Cloud [77] è una piattaforma cloud progettata per agevolare lo sviluppo di applicazioni IoT con microcontrollori Arduino ed ESP32. Essa offre connessioni sicure, certificate secondo lo standard ISO/IEC 27001 riguardante la sicurezza delle informazioni, dashboard per la visualizzazione dei dati in tempo reale, ampiamente personalizzabili, e un'API aperta per l'integrazione con sistemi esterni [78]. La piattaforma supporta inoltre l'automazione guidata degli avvisi tramite widget personalizzabili e interfacce definite dall'utente, nonché la possibilità di gestire l'intero sistema anche tramite applicazioni dedicate per dispositivi mobili (Fig. 1.35). I dati storici acquisiti possono essere visualizzati ed esportati per ulteriori analisi.

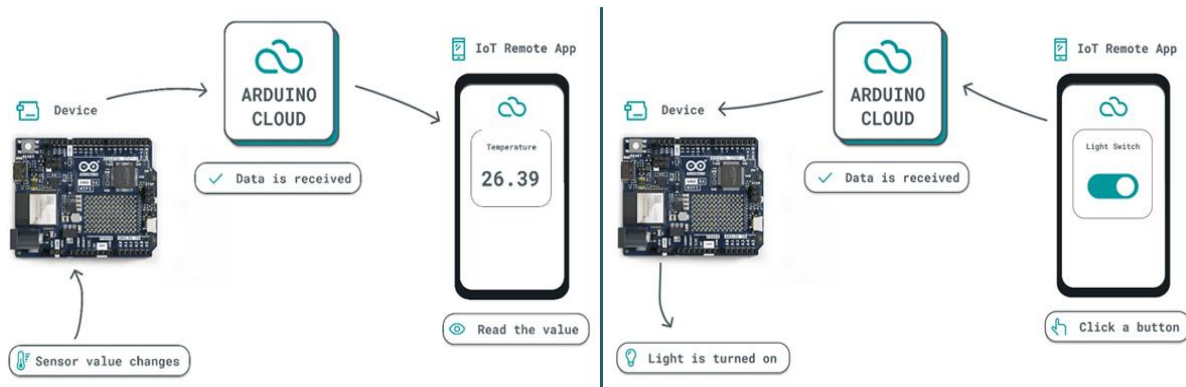


Fig. 1.35: Arduino Device (fonte: Arduino Docs)

Arduino Cloud supporta protocolli IoT standard quali MQTT e HTTPS, consentendo ai dispositivi di comunicare in modo efficiente con la piattaforma, sia in fase di invio sia di lettura dei dati. L'ecosistema Arduino Cloud (Fig. 1.36) comprende:

- Un ambiente di sviluppo integrato (IDE) per la programmazione delle schede;
- Un servizio di backend in cloud per la sincronizzazione dei dati dalle schede Arduino, ma anche da client esterni sviluppati in Python o JavaScript;
- Uno strumento grafico basato su dashboard web per il controllo e il monitoraggio della scheda, affiancato da un'applicazione mobile;
- API REST e strumenti a riga di comando, utili per automazioni e integrazioni su larga scala.

Oltre alla facilità di utilizzo e configurazione, i bassi costi di accesso (gratuito fino a due dispositivi collegati) e la possibilità di lavorare in ambiente Python [79], linguaggio di programmazione ampiamente diffuso negli ambiti IoT e openBIM per la sua flessibilità e per la vasta quantità di librerie disponibili open source [80], rendono Arduino Cloud una soluzione particolarmente adatta a contesti di ricerca scientifica e didattica.

Uno dei principali limiti della piattaforma è rappresentato dall'impossibilità di collegarla direttamente ai modelli BIM/IFC al fine di visualizzare tridimensionalmente i dati rilevati, restando così vincolati alla visualizzazione prevista dalle dashboard presenti nel cloud.

Per superare tale limite, risulta necessario integrare Arduino Cloud con ulteriori tecnologie, utilizzando la piattaforma come vettore di acquisizione e indirizzamento dei dati all'interno di configurazioni più articolate che prevedono la visualizzazione dei dati direttamente nei modelli digitali.

Nel contesto della presente ricerca, Arduino IoT Cloud si configura dunque come uno strumento intermedio particolarmente efficace per la gestione dello stream di dati provenienti dai sensori, consentendo di separare in modo chiaro la fase di acquisizione dei dati da quella di elaborazione e visualizzazione avanzata. Tale impostazione risulta vantaggiosa soprattutto in ambito sperimentale, dove è frequente la necessità di modificare la configurazione della rete di sensori, aggiornare i parametri di acquisizione o testare differenti strategie di monitoraggio senza intervenire sull'intera architettura del sistema. L'utilizzo di una piattaforma cloud consolidata permette inoltre di garantire continuità nella raccolta dei dati e una gestione centralizzata dei dispositivi, riducendo la complessità operativa nelle fasi iniziali di sviluppo e test.

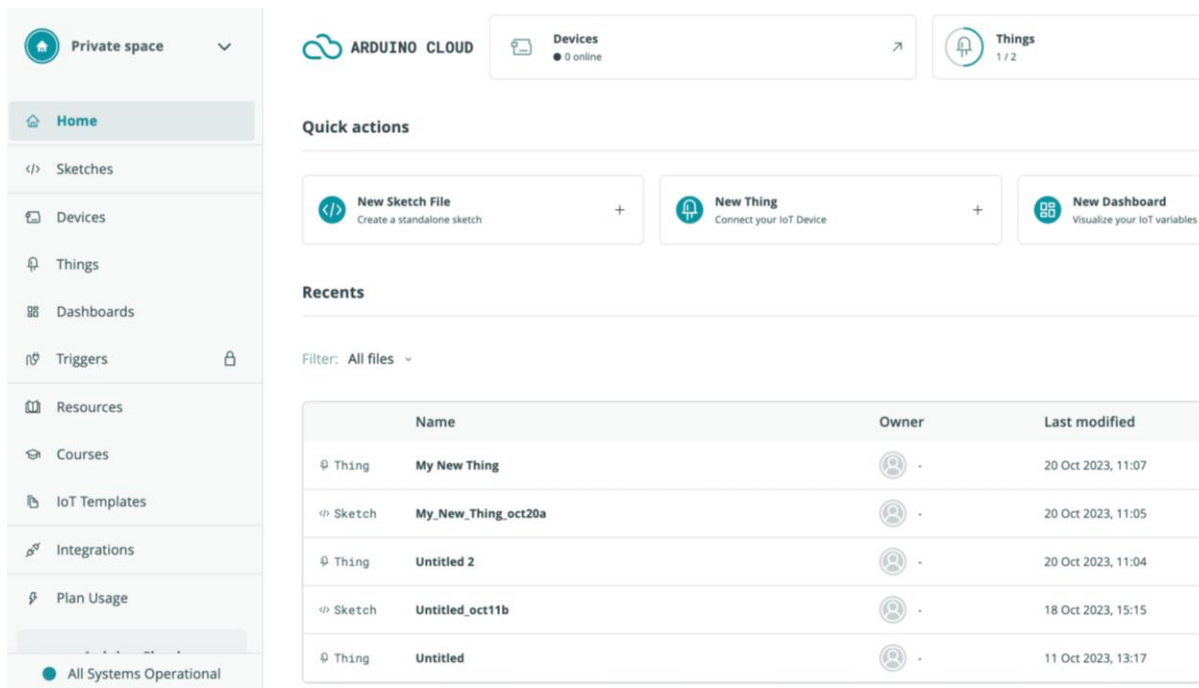


Fig. 1.36: Arduino Cloud (fonte: Arduino Docs)

Arduino Cloud pertanto non si configura esclusivamente come un visualizzatore di dati, ma come un livello di intermediazione capace di veicolare i dati acquisiti dai sensori verso altre piattaforme esterne più avanzate quali, ad esempio, Microsoft Azure, che verrà descritto nel paragrafo seguente.

1.3.7.2 Microsoft Azure – Power BI

Microsoft Azure [81] rappresenta una delle più diffuse e complete piattaforme cloud modulari attualmente disponibili sul mercato. L’ecosistema Azure comprende oltre duecento servizi integrati, coprendo un ampio spettro di ambiti applicativi dell’informatica, dalla gestione delle infrastrutture IoT agli ambiti relativi al Machine Learning, l’intelligenza artificiale, l’analisi dei dati e la gestione di database.

Per quanto riguarda lo streaming e la visualizzazione di dati, nella presente ricerca sono stati considerati in particolare i servizi Azure IoT Hub, Azure Stream Analytics (precedentemente noto come StreamJob) e Microsoft Power BI (Fig. 1.37).

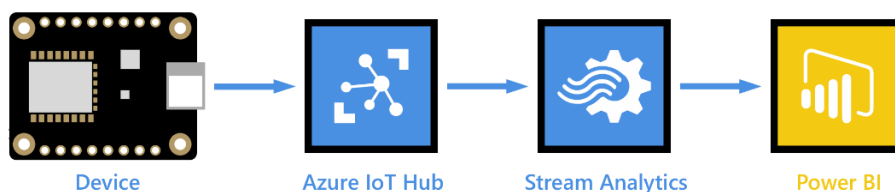


Fig. 1.37: Microsoft Azure (fonte: learn.microsoft.com)

Azure IoT Hub svolge il ruolo di gateway cloud, consentendo la comunicazione sicura tra il cloud e i dispositivi edge connessi, quali sensori e microcontrollori. Il servizio gestisce l’autenticazione sicura dei dispositivi, la trasmissione dei dati e abilita la comunicazione

bidirezionale (dal dispositivo al cloud e viceversa). Questo permette non solo la raccolta delle informazioni, ma anche il controllo da remoto dei dispositivi e l'aggiornamento dei firmware. Azure Stream Analytics è un motore di elaborazione dati in tempo reale, progettato per ricevere i dati dall'IoT Hub (o da altre sorgenti, come Event Hub o database). Attraverso query di tipo SQL-like, consente di filtrare i dati in base a soglie, rilevare anomalie, calcolare medie, trend o aggregazioni temporali. I risultati dell'elaborazione possono essere inviati direttamente a sistemi di archiviazione (Azure SQL o Data Lake), oppure verso dashboard di visualizzazione in tempo reale. Questo servizio rappresenta quindi il passaggio dai dati grezzi acquisiti dai sensori a informazioni strutturate e interpretabili, con tempi di latenza molto bassi.

Microsoft Power BI è la piattaforma di business intelligence di Microsoft, pienamente integrabile con Azure IoT Hub e Stream Analytics. Essa consente la creazione di dashboard interattive, grafici e report personalizzati, risultando particolarmente adatta al monitoraggio in tempo reale delle variabili sensoriali, all'analisi storica delle prestazioni e al supporto decisionale mediante indicatori chiave di prestazione (KPI). Un vantaggio rilevante di Power BI è rappresentato dalla facilità di consultazione delle informazioni, che lo rende uno strumento efficace anche per utenti non specializzati (Fig. 1.38).

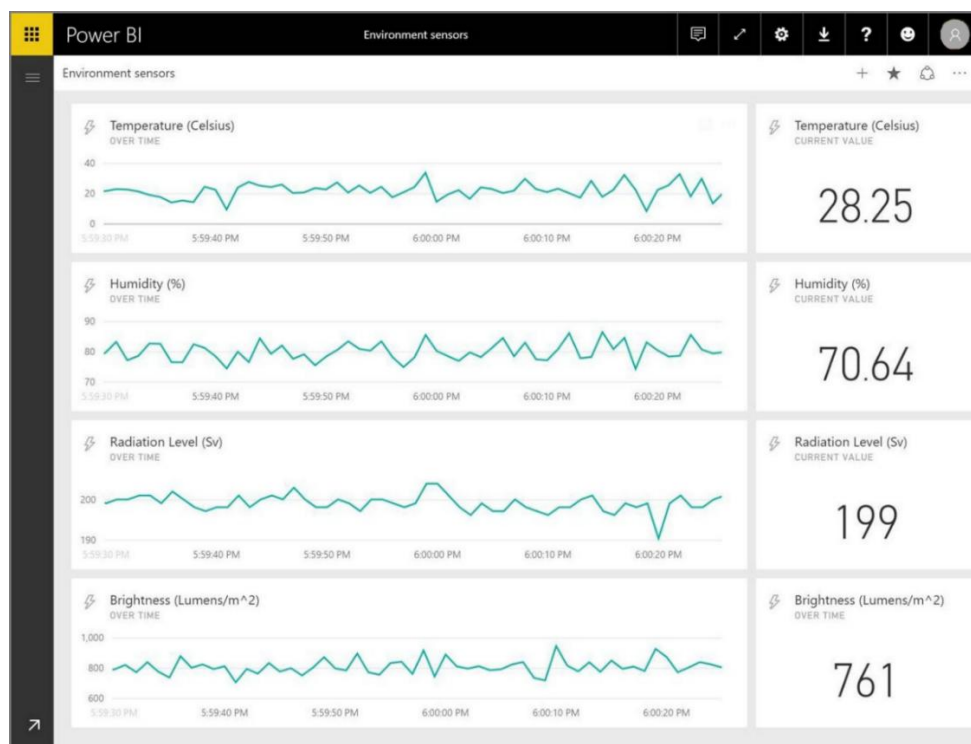


Fig. 1.38: Microsoft Power BI (fonte: www.learn.microsoft.com)

Analogamente a quanto osservato per la piattaforma Arduino IoT Cloud, anche in questo caso i dati visualizzati sono visibili prevalentemente tramite dashboard bidimensionali. Per ottenere una rappresentazione tridimensionale dei dati direttamente all'interno dei modelli informativi è necessario introdurre un ulteriore livello applicativo all'interno dell'architettura. Nel paragrafo successivo viene pertanto analizzata la piattaforma Autodesk Tandem, che consente di integrare i flussi di dati IoT con i modelli informativi tridimensionali, risultando

interoperabile con i servizi Azure descritti e permettendo la connessione tra modelli BIM/HBIM, stream di dati e strumenti di analisi.

1.3.7.3 Autodesk Tandem

Autodesk Tandem [82] è una piattaforma cloud sviluppata da Autodesk con l'obiettivo di facilitare la creazione e la gestione di Digital Twin basati su modelli BIM/HBIM. La piattaforma consente di importare, organizzare e strutturare i modelli provenienti da diverse fonti, trasformandoli in hub informativi capaci di integrare dati geometrici e informazioni alfanumeriche. In questo modo, il modello digitale non si limita a rappresentare la configurazione statica dell'edificio, ma diventa un contenitore dinamico di dati a supporto delle attività di gestione, manutenzione e monitoraggio (Fig. 1.39).

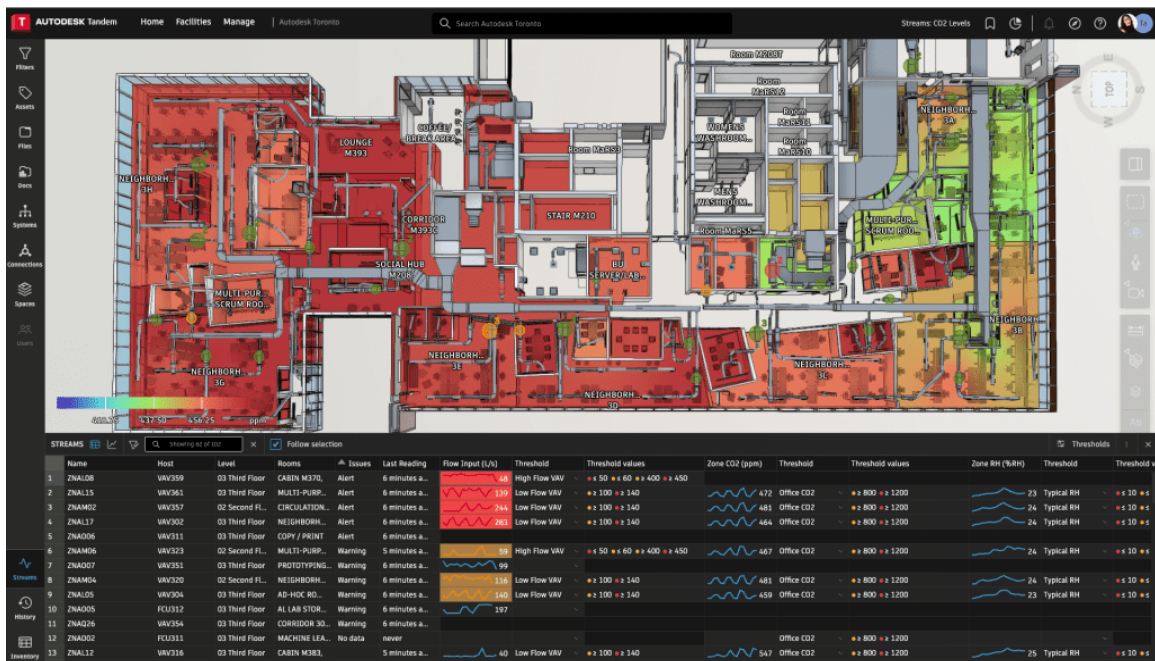


Fig. 1.39: Autodesk Tandem (fonte: www.intandem.autodesk.com)

Un ulteriore punto di forza della piattaforma è rappresentato dall'interoperabilità. Autodesk Tandem, infatti, risulta perfettamente integrabile con le piattaforme già descritte in precedenza, come Microsoft Azure, consentendo di collegare il gemello digitale ai servizi di acquisizione, gestione ed elaborazione dei dati. In particolare, attraverso l'integrazione con componenti quali Azure IoT Hub e Azure Stream Analytics, è possibile connettere i flussi di dati provenienti dalla sensoristica direttamente agli elementi del modello.

Questo approccio permette di sviluppare workflow completi che vanno dall'acquisizione dei dati grezzi (raw data) fino alla loro trasformazione in informazioni strutturate e conoscenza operativa, a supporto delle strategie di conservazione e gestione degli edifici storici.

Nel flusso descritto nel paragrafo precedente (Fig. 1.37), Autodesk Tandem può essere collocato a valle della fase di elaborazione svolta da Azure Stream Analytics, sostituendo così la visualizzazione bidimensionale offerta da Microsoft Power BI con una rappresentazione tridimensionale interattiva direttamente all'interno del modello digitale.

In questo contesto, Tandem consente non solo di visualizzare i dati associandoli agli elementi del modello, ma anche di ricevere notifiche e alert qualora i valori monitorati superino soglie

predefinite dall'utente, rafforzando il ruolo del modello come strumento di supporto alle decisioni.

Autodesk Tandem è disponibile anche in versione gratuita (fino a 1.000 asset e 200 stream gestiti senza oneri, con conservazione di serie temporali fino a 14 giorni), il che consente di testare in modo approfondito la piattaforma senza costi, rendendola così ideale per comprendere le procedure che stanno alla base di questi sistemi.

1.3.7.4 ACCA Software – usBIM.IoT

Un'ulteriore piattaforma di interesse nel panorama delle soluzioni BIM-IoT è usBIM.IoT [83], sviluppata da ACCA Software. La piattaforma è concepita per il monitoraggio e la gestione operativa dell'edificio, attraverso l'integrazione tra modelli BIM, con supporto anche per il formato IFC, e flussi di dati provenienti da sensori IoT.

L'integrazione tra modello informativo e dati dinamici consente di associare le misurazioni ambientali e operative agli spazi e agli elementi dell'edificio, rendendo possibile il controllo delle prestazioni e il supporto alle attività di Facility Management. In questo modo, il modello BIM viene utilizzato come interfaccia centrale per l'accesso alle informazioni di monitoraggio, superando la tradizionale separazione tra rappresentazione geometrica e gestione dei dati (Fig. 1.40).

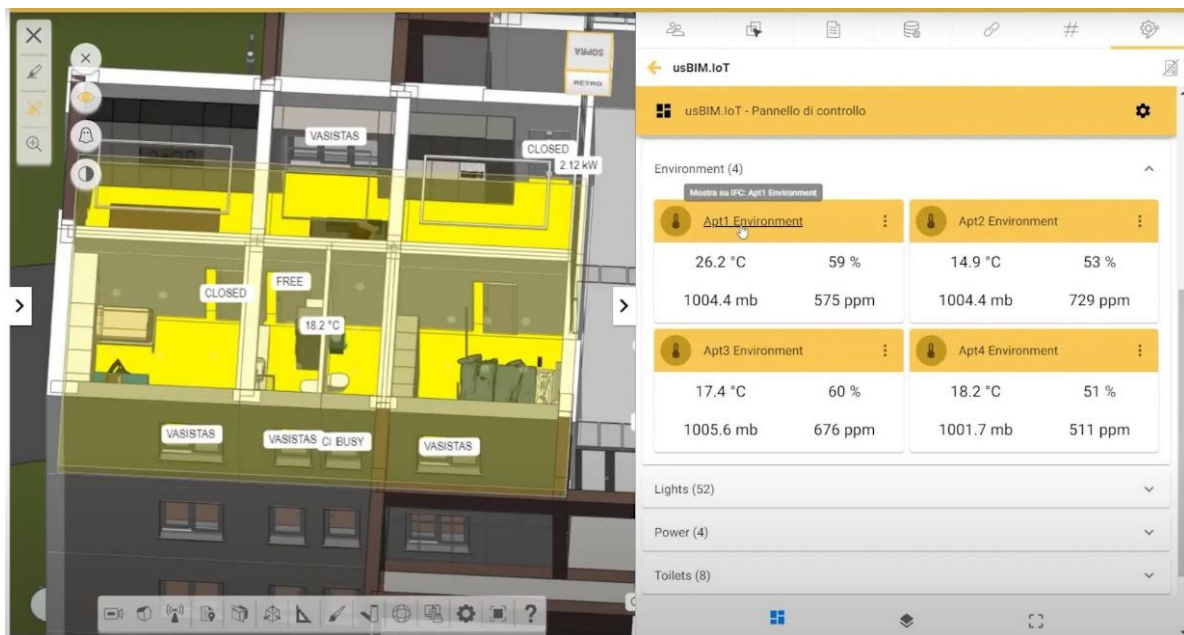


Fig. 1.40: usBIM.IoT (fonte: biblus.acca.it)

In presenza di dispositivi compatibili e di un'infrastruttura di comunicazione bidirezionale, usBIM.IoT consente inoltre l'invio di comandi di controllo verso gli impianti, ad esempio per la regolazione dell'illuminazione o dei sistemi HVAC.

La piattaforma si configura quindi non solo come uno strumento di visualizzazione e analisi dei dati, ma anche come sistema di supervisione operativa dell'edificio, avvicinandosi a logiche tipiche dei Building Management System (BMS) integrati con il BIM.

1.3.8 Alternative alle piattaforme di visualizzazione dello stream di dati

Oltre alle specifiche piattaforme dedicate alla gestione e alla visualizzazione di stream di dati, è possibile adottare approcci alternativi che prevedono l'integrazione diretta di informazioni dinamiche all'interno dei modelli BIM. Tali soluzioni, pur non essendo nate specificamente per l'analisi dei dati IoT in tempo reale, possono offrire vantaggi in termini di personalizzazione, flessibilità e controllo del flusso informativo.

In particolare, due approcci risultano rilevanti e largamente utilizzati in contesti accademici. Da un lato, l'impiego di software proprietari quali Autodesk Revit, esteso mediante l'ambiente di programmazione visuale Dynamo, che consente di collegare dati esterni al modello e di sviluppare logiche personalizzate di visualizzazione e analisi grazie anche alla possibilità di utilizzare al suo interno specifici script Python.

Dall'altro lato, l'utilizzo di strumenti open source, come Blender e l'add-on Bonsai (precedentemente noto come BlenderBIM), che permettono di sperimentare modalità più aperte, replicabili e svincolate da ecosistemi proprietari, risultando particolarmente adatte alla ricerca accademica e alle applicazioni sperimentali.

1.3.8.1 Autodesk Revit - Dynamo

Una delle soluzioni maggiormente adottate per la visualizzazione e l'integrazione di dati all'interno dei modelli BIM, come si vedrà più approfonditamente in Tab. 1.3, prevede l'utilizzo combinato di Autodesk Revit e Dynamo.

Dynamo è un ambiente di programmazione visuale open source integrato nei prodotti Autodesk, che permette di creare script grafici per automatizzare operazioni, gestire dati sensoriali e ottimizzare modelli BIM. È quindi ideale nel caso in cui si voglia ottenere uno scambio dinamico e automatizzato di dati tra i sensori e il modello. Il suo funzionamento si basa sul concetto di programmazione visuale, una modalità operativa che non prevede necessariamente la creazione da parte dell'utente di un elenco di codici, ma il collegamento e l'elaborazione di entità grafiche.

L'approccio visivo semplifica lo sviluppo di applicazioni isolando la complessità della codifica dagli utenti principali di Revit (architetti, progettisti, ingegneri, ecc.). Più precisamente, Dynamo utilizza i cosiddetti nodi, ciascuno dei quali svolge una funzione specifica, collegati tra loro tramite input e output che veicolano dati e frammenti di codice [84].

In Fig. 1.41 è riportato un esempio di programmazione visuale in Dynamo utilizzata per ottenere l'elenco dei locali presenti nel modello BIM, con i rispettivi identificativi univoci (ID). Il fatto di operare nello stesso ambiente Autodesk presenta il grande vantaggio di poter ottenere un riscontro immediato tra quanto progettato in Dynamo e il modello creato in Revit, senza la necessità di continue esportazioni o importazioni intermedie.

Grazie alla sua natura open source, Dynamo dispone inoltre di una libreria di nodi personalizzati in costante evoluzione. Gli utenti possono sviluppare nuovi nodi tramite linguaggi di programmazione come Python e renderli disponibili all'interno di un ambiente condiviso, contribuendo così all'ampliamento continuo delle funzionalità dello strumento. In questo modo Dynamo fornisce un supporto in continua evoluzione, capace di rispondere rapidamente alle esigenze degli utenti.

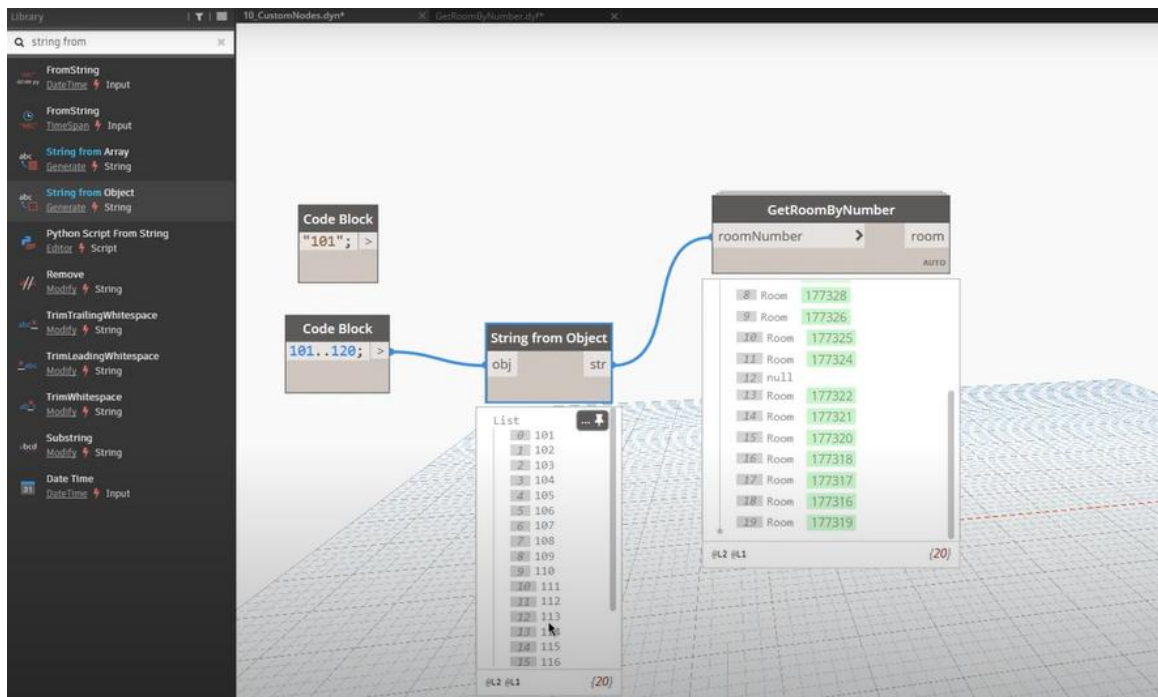


Fig. 1.41: Nodi Dynamo (fonte: DynamoBim.org)

Dynamo trova applicazione sia nelle fasi di progettazione, dove consente di gestire la complessità geometrica e informativa di edifici di nuova realizzazione e di edifici storici, per i quali gli strumenti standard dei software risultano spesso insufficienti, sia nella rappresentazione dinamica dei dati IoT all'interno dei modelli informativi.

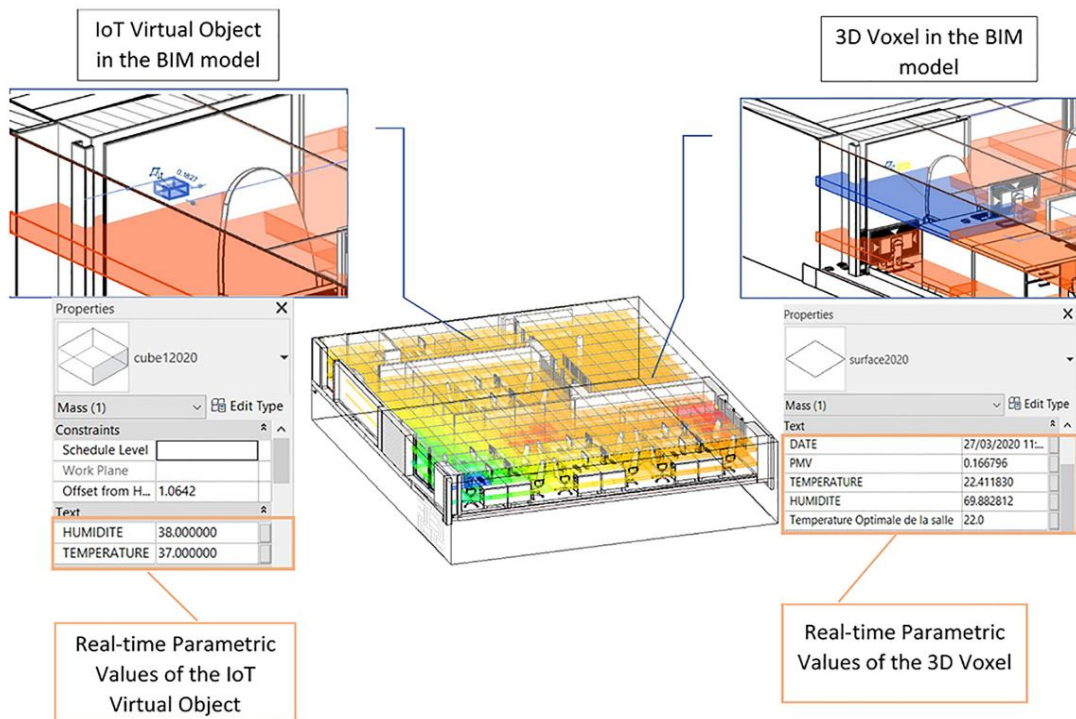


Fig. 1.42: PMV visualizzato nel modello informativo (fonte: Zahid et al., 2021)

Grazie alla sua flessibilità, Dynamo può essere utilizzato non solo per la gestione e l'automazione dei dati, ma anche come strumento di integrazione tra i valori rilevati dai

sensori e le analisi prestazionali degli ambienti interni. In particolare, è possibile collegare i dati di monitoraggio alle funzioni di calcolo dell'indice di comfort termico PMV (Predicted Mean Vote), elaborandoli direttamente all'interno del modello BIM. I risultati possono essere restituiti attraverso visualizzazioni cromatiche degli spazi, consentendo un'immediata interpretazione delle condizioni di comfort nei locali da parte dei progettisti e dei gestori dell'edificio (Fig. 1.42).

Questa elevata flessibilità spiega il largo impiego di Dynamo nei progetti di ricerca, in quanto permette lo sviluppo di soluzioni personalizzate e sperimentali. Tuttavia, va sottolineato come tale approccio rimanga comunque vincolato a un ecosistema proprietario, aspetto che può limitarne la replicabilità e l'indipendenza nel lungo periodo rispetto a soluzioni interamente basate su strumenti open source.

1.3.8.2 Blender-Bonsai

Restando nel contesto open source, gli sviluppi recenti del tool Bonsai [85] lo hanno reso uno degli strumenti più utilizzati in ambito di ricerca per quanto riguarda l'integrazione con gli standard openBIM, in particolare IFC, IDS e bSDD. Bonsai è un add-on open source sviluppato per Blender, software freeware e multiplatforma [86].

Blender, la cui prima release risale al 1995 grazie allo sviluppatore olandese Ton Roosendaal, nasce come strumento per la visualizzazione e creazione di animazioni 3D cinematografiche e render architettonici. Grazie alla sua natura open source e alla presenza di una comunità di sviluppatori indipendenti molto attiva, negli ultimi anni sono state progressivamente introdotte funzionalità orientate al BIM. In particolare, attraverso il continuo sviluppo dell'estensione Bonsai, è oggi possibile visualizzare, interrogare e gestire modelli IFC direttamente all'interno dell'ambiente di lavoro di Blender (Fig. 1.43).



Fig. 1.43: Visualizzazione di un modello IFC in Blender-Bonsai (fonte: Blender Extensions)

Bonsai consente non solo la visualizzazione del modello IFC ai fini della verifica della corretta esportazione, ma anche la creazione e modifica di elementi al suo interno, senza al contempo

perdere la caratteristica di formato aperto una volta sovrascritto il file IFC [87]. Questo aspetto rappresenta un elemento distintivo rispetto a molti visualizzatori IFC, che si limitano alla sola consultazione del modello senza consentirne l'editing.

Essendo inoltre sviluppato dagli stessi creatori di IfcOpenShell [88], toolkit open source che tramite l'omonima libreria Python consente di leggere, modificare e scrivere dati nei file IFC, lo strumento risulta facilmente estendibile e ben integrabile con questo tipo di linguaggio di programmazione.

Un'ulteriore caratteristica rilevante di Blender è quella di poter utilizzare un approccio alla manipolazione dei dati basato su logiche a nodi assimilabile agli ambienti di programmazione visuale come Dynamo. In questo contesto, Bonsai agisce come interfaccia per la gestione delle entità IFC all'interno della logica a nodi di Blender, consentendo di collegare oggetti, proprietà e regole attraverso un sistema vivo e interattivo. Tale approccio permette di configurare procedure automatizzate, ridurre la necessità di scripting manuale e garantire maggiore flessibilità nella gestione e personalizzazione del modello informativo (Fig. 1.44).

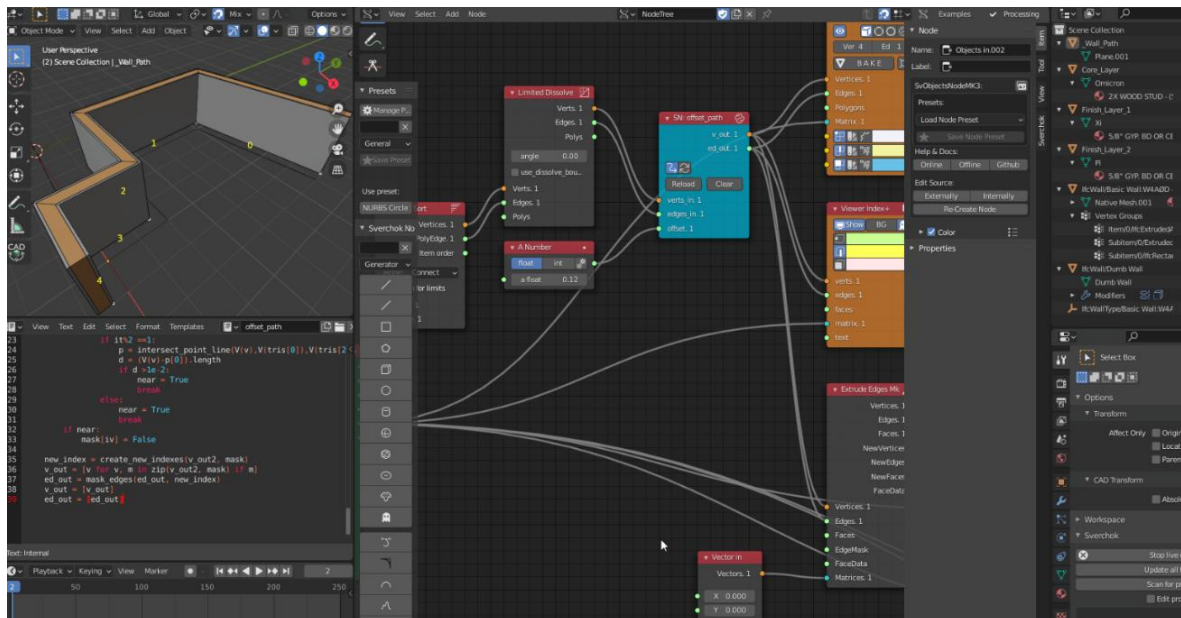


Fig. 1.44: Blender: programmazione orientata agli oggetti
(fonte: github.com/ifcOpenShell/ifcOpenShell/issues/1227)

Oltre alla visualizzazione e alla modifica dei file IFC, Bonsai consente di operare direttamente al suo interno anche con due ulteriori standard sviluppati da buildingSMART International. Nello specifico, è possibile associare dizionari bSDD direttamente agli elementi che costituiscono il modello e verificare la conformità di quest'ultimo rispetto alle specifiche previste dall'IDS, con la generazione automatica di report in formato .html che indicano nel dettaglio gli elementi conformi e quelli non conformi alle specifiche informative.

Bonsai si configura pertanto come uno strumento estremamente versatile, che non si limita alla semplice gestione dei file IFC, ma permette anche di integrare processi di validazione, arricchimento semantico e controllo della qualità informativa del modello. Tali caratteristiche lo rendono particolarmente adatto sia alle fasi di progettazione sia alle successive attività di gestione e monitoraggio, inclusa l'interrogazione di dati provenienti da sensori IoT, che

possono essere visualizzati e interrogati direttamente all'interno del modello informativo, come verrà approfondito nel paragrafo 3.1.3.2.

1.3.9 Gestione degli edifici: Facility Management

L'associazione no-profit IFMA (International Facility Management Association) definisce il Facility Management come la *“disciplina aziendale che coordina lo spazio fisico di lavoro con le risorse umane e l'attività propria dell'azienda e integra i principi della gestione economica e finanziaria d'azienda, dell'architettura e delle scienze comportamentali e ingegneristiche”* [89].

In termini operativi, il Facility Management riguarda l'insieme dei processi di pianificazione, implementazione e controllo attraverso i quali le Facility, ovvero gli edifici, impianti e servizi necessari a supportare le attività che si svolgono al loro interno, vengono individuate, specificate, reperite ed erogate, con l'obiettivo di garantire livelli di servizio adeguati e coerenti con le esigenze degli utenti e dell'organizzazione.

In ambito edilizio, il Facility Management è comunemente associato alla gestione e manutenzione degli edifici, includendo attività quali il controllo delle condizioni ambientali e di sicurezza, la gestione dei consumi energetici, il monitoraggio delle prestazioni degli impianti e la pianificazione degli interventi manutentivi ordinari e straordinari.

Il Facility Manager è la figura professionale responsabile del coordinamento di tali attività e dell'assunzione delle decisioni strategiche volte a migliorare la gestione degli asset immobiliari, basandosi su una continua e accurata analisi dei dati disponibili. Per il raggiungimento di tali obiettivi, il Facility Manager può avvalersi di numerosi strumenti digitali, tra cui la metodologia BIM.

L'integrazione fra BIM e Facility Management offre infatti vantaggi significativi. In primo luogo, viene assicurata una migliore comunicazione fra tutti gli stakeholder, evitando incomprensioni e conseguenti errori nelle fasi operative. In secondo luogo, grazie all'accesso a informazioni dettagliate contenute nel modello e costantemente aggiornate grazie ai sistemi di monitoraggio basati su sensori IoT, si possono effettuare valutazioni sull'intero ciclo di vita di un immobile.

In particolare, la disponibilità di dati ambientali ed energetici consente ai gestori di analizzare le prestazioni degli impianti, valutare i costi di esercizio e supportare decisioni mirate al contenimento dei consumi e all'ottimizzazione delle risorse. Attraverso l'utilizzo del BIM, i Facility Manager sono quindi in grado di ottimizzare le prestazioni complessive di un edificio lungo tutto il suo ciclo di vita, dalle fasi iniziali di esercizio fino alla dismissione, riuso o riconversione dell'immobile.

1.3.9.1 Facility Management del patrimonio storico

Il Facility Management applicato al patrimonio storico costruito assume una dimensione particolarmente complessa, poiché non si limita alla gestione funzionale degli spazi, ma deve conciliare esigenze di conservazione, fruizione e valorizzazione dei beni architettonici e artistici. A tale complessità si aggiunge la frequente scarsità, frammentazione o disomogeneità delle informazioni disponibili, tipica del contesto dell'edilizia storica.

Per poter intervenire in modo consapevole e pianificare strategie efficaci, è necessario disporre del maggior numero possibile di dati relativi alla storia e all'evoluzione del manufatto:

dalle tecniche costruttive impiegate nei singoli elementi, inclusi quelli impiantistici, fino alle trasformazioni stratificatesi nel tempo attraverso ampliamenti, modifiche o interventi di restauro. In assenza di tale conoscenza, l'analisi dello stato di fatto e la definizione di strategie di intervento risulterebbero inevitabilmente parziali o inadeguate.

La gestione di un edificio storico risulta pertanto più complessa rispetto a quella di una nuova costruzione, sia per la natura dei vincoli normativi e conservativi sia per il fatto di dover operare in un contesto informativo spesso incompleto.

In questo scenario, il Facility Manager di un edificio storico riveste un ruolo centrale nel:

- Organizzare la raccolta e gestione della digitalizzazione delle informazioni riguardanti il manufatto, coordinandosi con altre figure professionali specializzate in vari ambiti come quello storico, archivistico e informatico per quanto riguarda la gestione dei database;
- Analizzare lo stato di conservazione dell'edificio, individuando possibili criticità che potrebbero mettere a rischio l'integrità della struttura o delle opere contenute al suo interno;
- Analizzare lo storico dei consumi energetici e delle condizioni ambientali al fine di pianificare strategie di ottimizzazione e contenimento;
- Definire strategie di manutenzione preventiva, adottando standard (ad esempio UNI EN 15757, ASHRAE 2019, ecc.) ritenuti idonei alla conservazione in relazione alle caratteristiche del costruito e del contesto ambientale;
- Bilanciare funzionalità d'uso e salvaguardia del bene, assicurando comfort ambientale, efficienza energetica e sicurezza, senza alterare la materia storica;
- Analizzare eventuali feedback puntuali da parte di utenti e tecnici riguardo problematiche emerse e non prevedibili, in modo da pianificare gli interventi risolutivi in modo tempestivo.

I modelli BIM, e in particolare gli approcci HBIM, possono supportare il Facility Manager nella gestione integrata di tali informazioni, concentrandole in un ambiente digitale unificato. Tuttavia, nel caso del patrimonio storico, il solo utilizzo di modelli informativi statici non risulta sufficiente a garantire un controllo efficace e continuo delle condizioni d'uso e di conservazione.

Per rendere realmente efficiente il processo di Facility Management è necessario integrare il modello informativo con sistemi basati su sensoristica IoT, in grado di fornire dati aggiornati e continui sullo stato dell'edificio. Solo attraverso questa sinergia tra HBIM e IoT è possibile trasformare il modello da semplice archivio statico di informazioni a strumento dinamico di supporto decisionale, capace di guidare interventi tempestivi e mirati alla tutela e alla manutenzione programmata del bene storico.

1.3.9.2 Principali software per il Facility Management

Al fine di garantire la corretta fruizione, gestione e durabilità di un'opera nel tempo, è possibile avvalersi di molteplici strumenti digitali a supporto delle attività di manutenzione, controllo e pianificazione operativa.

I software per il Facility Management comprendono un insieme eterogeneo di soluzioni (Fig. 1.45), che spaziano dai sistemi di manutenzione CMMS (Computerized Maintenance Management System) ed EAM (Enterprise Asset Management) ai sistemi integrati di gestione

del workplace IWMS (Integrated Workplace Management System), fino alle più recenti piattaforme BIM-based e Digital Twin. Tali categorie non sono mutuamente esclusive, ma riflettono differenti livelli di complessità funzionale e maturità digitale.

Tra i sistemi più consolidati si collocano i CMMS, progettati per centralizzare le informazioni relative allo stato degli asset e pianificare interventi correttivi e preventivi. Essi consentono di monitorare il funzionamento di apparecchiature, impianti e infrastrutture, ottimizzando disponibilità e cicli manutentivi.

Un'evoluzione di tali sistemi è rappresentata dagli EAM, che estendono le funzionalità dei CMMS includendo una visione più ampia del ciclo di vita tecnico-economico degli asset, integrando aspetti legati ai costi, all'ammortamento e alla gestione a scala organizzativa. Tali piattaforme sono spesso connesse a sistemi ERP (Enterprise Resource Planning, software), gestionali integrati che automatizzano e gestiscono i processi aziendali.

Parallelamente, si sono sviluppati gli IWMS, piattaforme orientate a una gestione integrata del patrimonio immobiliare e degli spazi, che includono funzionalità di space e workplace management, asset management, manutenzione, gestione energetica, servizi agli utenti e, in alcuni casi, real estate e compliance normativa. Gli IWMS rappresentano oggi uno degli strumenti più completi per il Facility Management in contesti complessi quali campus universitari, ospedali e grandi portafogli immobiliari.

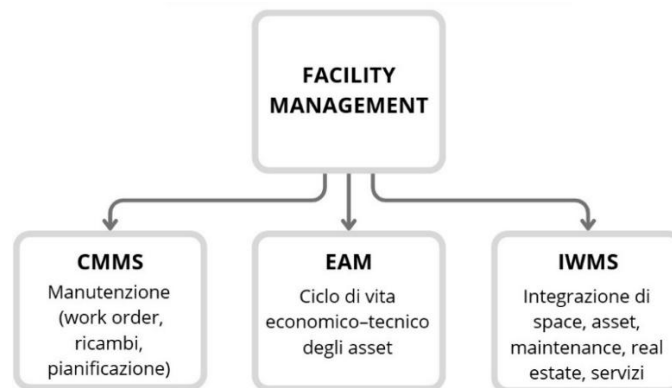


Fig. 1.45: Tipologie di sistemi FM

Negli ultimi anni, l'evoluzione dei processi BIM ha favorito la diffusione di soluzioni BIM-based per il Facility Management, nelle quali il modello informativo dell'edificio (spesso in formato IFC) viene utilizzato come base strutturante per la gestione degli asset e delle informazioni operative durante la fase di esercizio. In questo contesto si collocano anche le più recenti piattaforme di Digital Twin, che superano il concetto di semplice archivio informativo introducendo una rappresentazione digitale dell'edificio continuamente aggiornata, potenzialmente connessa a flussi di dati provenienti da sensori e sistemi di monitoraggio IoT. Nei casi relativi al patrimonio storico, dove la conoscenza del manufatto risulta spesso frammentata e incompleta, l'integrazione di dati provenienti da sensori IoT consente di ampliare significativamente le potenzialità di tali sistemi, trasformandoli da strumenti prevalentemente documentali o reattivi in piattaforme orientate alla manutenzione programmata e, in prospettiva, predittiva. L'uso combinato di modelli informativi e dati di monitoraggio ambientale risulta particolarmente rilevante per il controllo delle condizioni microclimatiche e per la conservazione del bene.

Al fine di fornire una panoramica critica delle soluzioni attualmente disponibili sul mercato nell'ambito del Facility Management, sono stati analizzati i software maggiormente diffusi, riassunti nella Tab. 1.1. L'analisi si concentra sulla categoria funzionale di appartenenza, sugli ambiti FM coperti, sul grado di integrazione con modelli BIM/IFC e sul livello di maturità rispetto ai concetti di Digital Shadow e Digital Twin, evidenziando le principali differenze tra approcci tradizionali e soluzioni più avanzate.

	Software	Categoria	Ambito FM	BIM	Digital Shadow / Digital Twin	Note
[90]	Accruent (<i>Accruent Company</i>)	CMMS / EAM	Asset, Maintenance	NO	Digital Shadow	Gestione manutenzioni e asset; BIM non centrale. Licenza: Proprietario.
[91]	SpaceIQ (<i>Eptura</i>)	IWMS	Space, Asset, Workplace	Parziale	Digital Shadow	Può evolvere verso configurazioni assimilabili a un Digital Twin degli spazi quando integrato con modelli BIM e dati provenienti da sensori, collocandosi quindi in una posizione intermedia tra Digital Shadow e Digital Twin. Licenza: Proprietario.
[82]	Autodesk Tandem (<i>Autodesk</i>)	Digital Twin platform FM-oriented	Asset, Maintenance	SI (IFC-based)	Digital Twin	Modello BIM condiviso per la creazione del Digital Twin dell'edificio. Licenza: Versione free con limitazioni.
[92]	Building in Cloud (<i>Namirial</i>)	CDE / BIM-based FM	Asset, Maintenance	SI (IFC-based)	Digital Shadow	Si configura come un Common Data Environment (CDE) orientato al BIM che, pur non essendo un software di FM in senso stretto, supporta attività di gestione degli asset e della manutenzione attraverso l'uso del modello informativo dell'edificio come base dati durante la fase di esercizio. Licenza: Proprietario.
[93]	Corrigo/ VergeSense (<i>JLL Technologies</i>)	CMMS / FM	Maintenance, Asset	NO	Digital Shadow	Composto da vari moduli che coprono tutti gli aspetti della vita di un edificio, dalla realizzazione alla gestione. Tra i moduli analizzati: - Corrigo per la gestione degli asset e delle manutenzioni. - VergeSense per i sensori IoT su visualizzatore 2D dell'edificio. Licenza: Proprietario.
[94]	Siemens Building X (<i>Siemens</i>)	Digital Twin platform	Asset, Maintenance, Energy	SI (IFC-based)	Digital Twin	Integrazione BIM-BMS-IoT per la gestione di edifici complessi. Licenza: Proprietario.
[95]	eMaint (<i>Fluke Corporation</i>)	CMMS / EAM	Maintenance	NO	Digital Shadow	Gestione degli asset e della manutenzione.

	Software	Categoria	Ambito FM	BIM	Digital Shadow / Digital Twin	Note
						Orientato a manutenzione industriale. Licenza: Proprietario.
[96]	Facilio (Facilio Inc.)	Smart FM / DT platform	Asset, Energy, Maintenance	Parziale	Digital Twin	Digital Twin navigabile per operazioni immobiliari. Licenza: Proprietario.
[97]	FM:Systems (FM:Systems Group)	IWMS	Space, Asset, Workplace	Parziale	Digital Shadow	BIM viewer e dashboard orientato allo space management. Licenza: Proprietario.
[98]	Geomap (Geomap srl)	CAFM	Asset, Maintenance	SI (IFC-based)	Digital Shadow	Gestione dell'immobile dal rilievo alla digitalizzazione 3D. Integrazione GIS e BIM. Licenza: Proprietario.
[99]	Infocad (Descor srl)	CAFM / Energy FM	Asset, Energy, Maintenance	Parziale	Digital Shadow	Gestione di anagrafiche, manutenzioni, asset, anche tramite l'utilizzo di sensori IoT. Attività di manutenzioni facilmente accessibili tramite app. Licenza: Proprietario.
[100]	Limble CMMS (Limble)	CMMS	Maintenance	NO	Digital Shadow	Gestione degli asset, della manutenzione e degli ambienti di lavoro. Modulo aggiuntivo per la manutenzione predittiva (IoT Predictive Maintenance). Licenza: Proprietario.
[101]	Maximo Asset Management (IBM)	EAM	Asset, Maintenance	NO	Digital Shadow	Gestione degli spazi e degli asset, assegnazione di ticket per la manutenzione. Tra gli add-On integrabili, Omnio Edge consente di collegarlo a sensori IoT. Licenza: Proprietario.
[102]	OpenMAINT (Tecnoteca srl)	CAFM	Asset, Maintenance	SI (IFC-based)	Digital Shadow	Gestione degli spazi e degli asset, assegnazione di ticket per la manutenzione anche tramite app. Supporto IFC e GIS. Possibilità di gestire il magazzino in base alle manutenzioni previste in modo da ridurre al minimo il fermo delle attività. Licenza: Open source.
[103]	Oracle Maintenance Cloud (Oracle)	EAM	Maintenance	NO	Digital Shadow	Gestisce asset e assegna ticket alle manutenzioni. Orientato a contesti industriali. Integrando l'app Oracle IoT è possibile monitorare macchinari

	Software	Categoria	Ambito FM	BIM	Digital Shadow / Digital Twin	Note
						per prevenire possibili anomalie (machine learning). Non è direttamente collegato a un modello BIM nel quale vedere in maniera intuitiva la collocazione dei singoli asset. Licenza: Proprietario.
[104]	OrthoGraph (<i>OrthoGraph Enterprise</i>)	BIM-based FM	Asset, Space	Si (IFC-based)	Digital Shadow	Modello 3D come base dati; IoT non centrale. Licenza: Proprietario.
[105]	Planon (<i>Building Connection</i>)	IWMS	Asset, Space, Energy	Parziale	Digital Twin	Connettore openBIM (estrae e utilizza dati derivanti dai modelli informativi e riportare eventuali modifiche dal FM al modello BIM). Consente di gestire tutti gli aspetti degli asset, dal complesso di edifici sino ai singoli ambienti tramite sensori IoT. Licenza: Proprietario.
[106]	PlanRadar (<i>Plan Radar srl</i>)	CDE / FM	Maintenance, Inspection	Parziale	Digital Shadow	Orientato più alle fasi progettuali e di costruzione. Ticket e ispezioni su modelli BIM. Licenza: Proprietario.
[107]	Tririga (<i>IBM</i>)	IWMS	Space, Asset, Real Estate	NO	Digital Shadow	Gestisce asset, ticket manutenzioni, spazi, ecc. Possibilità di segnalazione tramite app dei guasti con documentazione fotografica e priorità di intervento. Licenza: Proprietario.
[108]	TS Enterprise Asset Management (<i>TeamSystem</i>)	CAFM / Property FM	Asset, Maintenance	Parziale	Digital Shadow	Integrazione BIM in contesto gestionale. La gestione degli elementi oggetto di manutenzione può avvenire sia su planimetrie e schemi 2D, che su modelli BIM. Licenza: Proprietario.
[109]	UsBIM (<i>ACCA Software</i>)	BIM-based FM	Asset, Maintenance	Si (IFC-based)	Digital Twin	usBIM è un sistema di BIM management tools comprendente numerose applicazioni specifiche per ogni ambito, dalle fasi iniziali di progettazione sino alla gestione e manutenzione dell'edificio. Si va da applicazioni come UsBIM.maint e UsBIM.facility legate alla gestione di asset e piani di manutenzioni integrati al modello BIM dell'opera, ad altre applicazioni come usBIM.IoT

Software	Categoria	Ambito FM	BIM	Digital Shadow / Digital Twin	Note
					incentrate sull'integrazione del modello con sistemi e sensori IoT. Licenza: Proprietario (freemium).

Tab. 1.1: Software di Facility Management

Dall'approfondimento di questi software è emerso quanto segue:

- Molte delle piattaforme esaminate presentano le medesime caratteristiche sia in termini di utilizzo che di interfaccia (visualizzazione di dati mediante dashboard bidimensionali). L'integrazione con modelli BIM non rappresenta ancora uno standard diffuso;
- Il mercato del Facility Management è in rapida espansione, e tende sempre più verso soluzioni integrate che combinano gestione degli asset, monitoraggio IoT e interoperabilità BIM. Le software house che offrono ecosistemi unificati risultano maggiormente competitive, in quanto consentono agli operatori di interagire con un unico ambiente digitale che comprende tutti gli aspetti di gestione e manutenzione. È così possibile operare in modo più efficiente per quanto riguarda la gestione degli ambienti (Space Management), dei singoli asset che costituiscono l'edificio (Asset Management) e le operazioni di Facility come l'assegnazione di ticket, priorità delle manutenzioni e controllo dell'edificio tramite sensori IoT;
- Diversi software offrono sistemi di gestione delle manutenzioni molto efficaci, spesso supportati da applicazioni mobili. Tuttavia, senza un modello BIM o un visualizzatore integrato, risulta difficile per l'operatore individuare in modo rapido e intuitivo la componente che necessita di manutenzione;
- La quasi totalità delle soluzioni analizzate è basata su modelli di licenza proprietari a sottoscrizione mediante abbonamenti. Un'eccezione rilevante è rappresentata da OpenMAINT, sviluppato da Tecnoteca, che, essendo distribuito come software open source, non presenta alcuna limitazione di licenza e non vincola alla sottoscrizione di abbonamenti basati sul consumo di dati. Oltre a ciò, esso risulta ampiamente configurabile e personalizzabile a seconda delle specifiche esigenze. A fronte di queste grandi potenzialità c'è da porre l'attenzione sul fatto che la sua configurazione, trattandosi di diversi software open source che interagiscono tra loro (Database PostgreSQL, Tomcat, Apache, Alfresco, Java, ecc.), è molto complessa per chi non ha competenze informatiche approfondite, il che ne limita di fatto la diffusione.

Nel complesso, emerge come il settore sia ancora caratterizzato da una prevalenza di soluzioni orientate al Digital Shadow, mentre le configurazioni pienamente assimilabili a un Digital Twin bidirezionale, integrato con BIM e IoT, risultano ancora minoritarie e concentrate in piattaforme di fascia medio-alta.

1.3.10 Principali piattaforme IoT

Come emerso dal paragrafo precedente, l'evoluzione dei software di Facility Management è sempre più strettamente legata alla disponibilità di dati provenienti dal monitoraggio in tempo reale dell'edificio. In tale contesto, i sistemi FM, pur offrendo funzionalità applicative avanzate

per la gestione degli asset e delle attività operative, si basano spesso su infrastrutture esterne dedicate alla raccolta, trasmissione ed elaborazione dei dati provenienti dai sensori.

Tali infrastrutture sono rappresentate dalle piattaforme IoT, che operano a un livello differente rispetto ai software di Facility Management, fornendo servizi di:

- Connettività e comunicazione;
- Gestione e autenticazione dei dispositivi;
- Raccolta e archiviazione dei dati;
- Elaborazione, analisi e integrazione con sistemi esterni.

Le piattaforme IoT non gestiscono direttamente gli asset edilizi, ma costituiscono l'ossatura tecnologica su cui possono innestarsi sistemi FM, BIM-based o Digital Twin.

La Tab. 1.2 fornisce una panoramica delle principali piattaforme IoT attualmente diffuse, includendo sia soluzioni proprietarie sia open source.

Le piattaforme sono state confrontate sulla base di criteri qualitativi, adottando una classificazione sintetica finalizzata a rendere confrontabili soluzioni eterogenee per tipologia tecnologica, ambito applicativo e livello di funzionalità. In particolare:

- Categoria: indica la tipologia tecnica della piattaforma IoT, distinguendo tra soluzioni generiche per la gestione di dispositivi connessi (IoT Cloud Platform), piattaforme orientate a contesti industriali e infrastrutturali (Industrial IoT Platform), strumenti focalizzati sull'analisi dei dati provenienti da sensori (IoT Analytics Platform) e piattaforme progettate per l'integrazione tra sistemi IoT e modelli informativi BIM (BIM-IoT Integration Platform);
- Ambito applicativo: identifica il principale contesto di utilizzo per cui la piattaforma è progettata, con riferimento al profilo degli utenti e alla scala applicativa (ad esempio ambito didattico, ricerca, smart buildings o contesti industriali). Tale classificazione consente di distinguere soluzioni orientate alla prototipazione e alla sperimentazione da piattaforme concepite per contesti operativi complessi;
- Gestione dispositivi: valuta il livello di supporto offerto dalla piattaforma per la gestione dei sensori e degli attuatori IoT, includendo aspetti quali la registrazione dei dispositivi, l'autenticazione, la sicurezza, la gestione di flotte di dispositivi e l'affidabilità della comunicazione;
- Analytics / Data analysis: descrive le capacità della piattaforma in termini di elaborazione e analisi dei dati raccolti, includendo funzionalità quali analisi temporale, aggregazione dei dati, rilevamento di anomalie e integrazione con strumenti di analisi avanzata. Tale criterio risulta particolarmente rilevante in relazione a scenari di monitoraggio continuo e applicazioni basate su modelli Digital Shadow o Digital Twin.

I livelli qualitativi adottati per la valutazione delle funzionalità sono i seguenti:

- Limitata: supporto funzionale essenziale, generalmente adatto a prototipi, applicazioni didattiche o sistemi di piccola scala;
- Media: funzionalità consolidate, utilizzabili in contesti reali con alcune limitazioni in termini di scalabilità o integrazione;
- Avanzata: supporto completo e scalabile, orientato a contesti enterprise, industriali o a sistemi complessi di gestione dei dati IoT.

	Piattaforma	Categoria	Ambito applicativo	Gestione dispositivi	Analytics / Data analysis	Note
[110]	Arduino IoT Cloud (<i>Arduino</i>)	IoT Cloud Platform	Didattica / Prototipazione	Limitata	Limitata	Orientata a prototipi e didattica; non progettata per integrazioni strutturate con sistemi FM o Digital Twin. Licenza: Freemium.
[111]	AWS IoT Core (<i>Amazon Web Services</i>)	IoT Cloud Platform	Industria / Smart buildings	Avanzata	Avanzata	Fornisce servizi infrastrutturali versatili per la gestione dei flussi IoT; l'integrazione con BIM, FM o Digital Twin richiede lo sviluppo di middleware. Licenza: Proprietario.
[112]	Azure IoT Hub (<i>Microsoft</i>)	IoT Cloud Platform	Smart Buildings / Industria	Avanzata	Avanzata	Ampiamente utilizzata in ambito smart building. Offre una forte integrazione con l'ecosistema Microsoft, in particolare con Azure Digital Twins, risultando una delle piattaforme più diffuse per architetture Digital Twin. Licenza: Proprietario.
[113]	Bosch IoT Suite (<i>Bosch</i>)	Industrial IoT Platform	Industria / Smart City	Avanzata	Avanzata	Orientata a contesti industriali e smart city. Non utilizzata in edilizia residenziale; l'applicazione in ambito FM avviene tramite adattamenti e integrazioni specifiche. Licenza: Proprietario.
[114]	Particle (<i>Particle Industries</i>)	IoT Cloud Platform	Hardware IoT / Prototipazione	Avanzata	Limitata	Focalizzata su hardware, connettività e gestione dei dispositivi. Presenta una rilevanza limitata per applicazioni building-centric e per l'integrazione con sistemi BIM o FM. Licenza: Proprietario.
[115]	Siemens Insights Hub (<i>Siemens</i>)	Industrial IoT Platform	Industria / Infrastrutture	Avanzata	Avanzata	Focalizzata su Digital Twin industriali e processi complessi. Applicabile a edifici e infrastrutture ad alta intensità impiantistica, ma non progettata specificamente per il FM. Licenza: Proprietario.

	Piattaforma	Categoria	Ambito applicativo	Gestione dispositivi	Analytics / Data analysis	Note
[116]	ThingWorx (PTC)	Industrial IoT Platform	Industria / Servizi	Avanzata	Avanzata	Utilizzata per lo sviluppo di applicazioni IoT avanzate. Spesso integrata con sistemi EAM e FM enterprise per scenari di manutenzione predittiva e gestione avanzata degli asset. Licenza: Proprietario.
[117]	ThingsBoard (ThingsBoard)	IoT Cloud Platform	Ricerca / Soluzioni custom	Avanzata	Media	Ampliamente utilizzata in ambito accademico e sperimentale per soluzioni BIM-IoT custom e Digital Twin replicabili. Licenza: Open source (Community Edition e versione Enterprise).
[118]	ThingSpeak (MathWorks)	IoT Analytics Platform	Ricerca / Didattica	Limitata	Avanzata	Basata sull'ecosistema MATLAB (ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica scritto in linguaggio di programmazione "C"). Utilizzata prevalentemente in ambito accademico per la raccolta e l'analisi di dati ambientali e microclimatici, più che per sistemi IoT produttivi. Licenza: Freemium.
[83]	usBIM.IoT (ACCA Software)	BIM-IoT Integration Platform	BIM / Facility Management	Media	Avanzata	Modulo per la gestione e supervisione di dispositivi IoT integrato con modello BIM; associa i sensori al Digital Twin IFC in tempo reale e visualizza dati sensoriali nel modello 3D; possibile integrazione con sistemi FM e altre app usBIM. Licenza: configurazioni modulari freemium/cloud.

Tab. 1.2: Confronto tra piattaforme IoT utilizzate per la gestione e l'analisi di dati provenienti da sensori

Dall'analisi comparativa delle piattaforme IoT emergono alcune considerazioni:

- La maggior parte delle piattaforme analizzate è orientata a contesti generici o industriali, privilegiando la gestione di grandi volumi di dati rispetto alla possibilità di scalare gli approcci proposti all'edilizia residenziale convenzionale o peculiare come quella storica;

- La quasi totalità delle soluzioni prevede abbonamenti basati sul numero di dispositivi connessi e sulla quantità di dati utilizzati, rendendole potenzialmente troppo onerose per applicazioni di piccola o media scala;
- Le soluzioni open source offrono maggiore flessibilità in termini di personalizzazione e controllo del dato, ma risultano prevalentemente adottate in contesti di ricerca accademica e sperimentazione. Nonostante ciò, tali piattaforme presentano caratteristiche particolarmente adatte a scenari non standardizzati come quelli relativi alla gestione del patrimonio storico, dove modularità e adattabilità rappresentano requisiti centrali;
- In generale, i dati sensoriali vengono trattati come flussi numerici indipendenti dal contesto spaziale e informativo dell'edificio. Ciò rende necessaria un'integrazione esterna con modelli informativi BIM/HBIM affinché tali dati acquisiscano significato operativo e supportino realmente processi decisionali.

Nei contesti relativi al patrimonio storico emerge pertanto la necessità di avere soluzioni flessibili, modulari e interoperabili, capaci di adattarsi alle specificità del bene e di integrare in modo coerente dati di monitoraggio continuo con modelli informativi BIM, superando la separazione tra infrastruttura IoT e sistema di gestione edilizia.

1.4 Review bibliografica

Dopo aver illustrato il quadro tecnologico entro cui si colloca la presente ricerca, il passo successivo è stato quello di condurre una review della letteratura inerente alle modalità di visualizzazione dello stream di dati IoT all'interno di modelli BIM/HBIM, con particolare attenzione agli studi che adottano procedure basate su standard openBIM. Oltre all'analisi dei contributi selezionati, è stata effettuata un'indagine bibliometrica sui legami tra le keyword associate alle pubblicazioni.

Al fine di comprendere lo stato dell'arte, è stata inizialmente condotta una panoramica sulle recenti pubblicazioni (2018-2025, con aggiornamento al 01/09/2025). Il criterio di selezione ha privilegiato gli articoli che proponevano un flusso di lavoro in grado di visualizzare dati provenienti da sensori applicati agli edifici, con preferenza per casi studio su edifici storici, sia tramite dashboard 2D che mediante modelli 3D, impiegando sia software proprietari che open source. Sono stati esclusi i lavori riconducibili esclusivamente a review bibliografiche.

Nello specifico, la query di selezione preliminare degli articoli tramite il database bibliografico Scopus [119] è espressa dalla seguente stringa:

```
TITLE-ABS-KEY ( ( bim OR "Building information modeling" OR "HBim" OR "Heritage Building Information Modeling" OR "IFC" OR "open standard" OR "open source" OR "openBim" ) AND ( "Building" OR "Heritage" ) AND ( "IoT" OR "Internet of Things" OR "Digital Twin" ) AND ( "comfort" OR "monitoring" OR "data visualization" OR "Diagnostics" OR "sensors" OR "indoor condition monitoring" OR "air quality" OR "Environmental monitoring" OR "facility management" OR "Big Data" OR "AI" OR "temperature" OR "Humidity" OR "CO2" OR "PMV" OR "TVOC" OR "HVAC" OR "MEP" OR "Living lab" ) AND NOT "structural" . ) AND PUBYEAR > 2017 AND PUBYEAR < 2026 AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA , "ENGI" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA , "COMP" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA , "ENER" ) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) ) AND ( LIMIT-TO ( PUBSTAGE , "final" ) )
```


Per la determinazione di questi raggruppamenti di keyword, VOSviewer analizza le loro co-occorrenze, ovvero la presenza o meno delle stesse keyword in articoli differenti, e successivamente tramite uno specifico algoritmo crea i vari raggruppamenti.

In particolare, si può osservare una divisione delle keyword in 11 cluster, a testimonianza di quanto i temi siano trasversali a molteplici contesti. In particolare, i 3 macro-cluster più rilevanti risultano essere:

- Cluster BIM (giallo); integrazione del BIM nella progettazione architettonica, realizzazione dei Digital Twin, operazioni di Facility, ecc. Risulta elemento cardine tra tutti i temi trattati.
- Cluster IoT (rosso); applicazioni IoT per raccolta dati tramite sensori. Risulta fortemente legato alle metodologie open source e al BIM, oltre che agli aspetti legati al comfort termico, l'efficientamento energetico (cluster verde) e il Facility Management (cluster blu).
- Cluster Digital Twin (arancione); utilizzo dei gemelli digitali per la gestione e visualizzazione dei dati durante il ciclo di vita degli edifici. Anch'esso legato agli aspetti visti precedentemente, oltre che agli strumenti inerenti l'intelligenza artificiale AI (cluster viola).

Se la rete delle keyword illustrata in precedenza consente di individuare i collegamenti tra i diversi termini, le mappe di densità di VOSviewer permettono di identificare in modo immediato gli argomenti maggiormente trattati e quelli meno esplorati all'interno della letteratura attuale (Fig. 1.47).

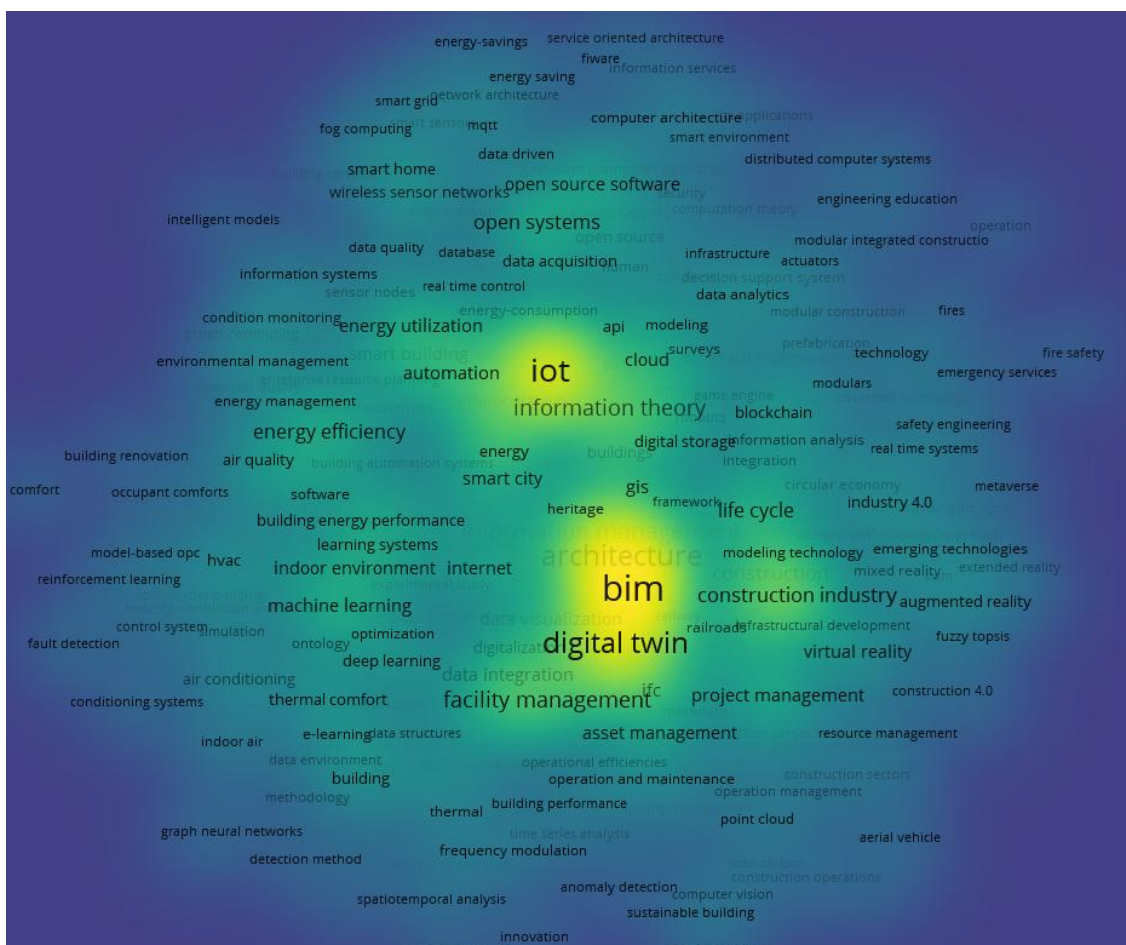


Fig. 1.47: Mappe di densità Keyword (fonte: VOSviewer)

Dall'analisi congiunta delle mappe emergono le seguenti osservazioni:

- Il BIM risulta centrale in tutte le ricerche ed è connesso agli altri cluster più rilevanti inerenti l'IoT, i Digital Twin e il Facility Management;
- L'Internet of Things è, al pari dei Digital Twin, l'argomento maggiormente citato ed è collegato alle tecnologie open source, oltre che al monitoraggio dei dati in tempo reale per la determinazione dei livelli di comfort negli edifici;
- L'HBIM è un cluster isolato e poco indagato. Non presenta collegamenti diretti con gli altri cluster;
- Il più generico termine *heritage* presenta collegamenti con BIM e IoT, ma all'interno della letteratura in esame non risulta significativo in termini di citazioni;
- Non emerge una connessione diretta tra BIM e metodologie open source finalizzate alla visualizzazione di dati;
- Mancano riferimenti evidenti a openBIM, IFC e a strumenti come IfcOpenShell nella visualizzazione dello stream di dati IoT;
- Open source e, in generale, i sistemi aperti, sono collocati all'interno del cluster IoT, ma presentano solo deboli collegamenti con gli altri temi della ricerca;
- IFC risulta molto marginale rispetto ai temi trattati. Presenta comunque collegamenti con BIM / IoT e Digital Twin;
- In generale, i temi legati al monitoraggio sulle prestazioni degli edifici (consumi, qualità degli ambienti interni, ecc.) sono connessi alle tecnologie open source e IoT, ma non alla visualizzazione dei dati all'interno di modelli;
- Sono stati utilizzati casi studio differenti tra loro, dal singolo edificio a campus universitari, fino alle Smart Cities, a testimonianza della scalabilità degli strumenti approfonditi nella ricerca.

Nel complesso, l'analisi delle reti bibliometriche ha evidenziato un gap nella letteratura per quanto riguarda l'utilizzo di procedure che, tramite l'applicazione di standard openBIM applicati a modelli informativi, consentano la visualizzazione di stream di dati IoT relativi alle prestazioni degli edifici (ad esempio consumi energetici e qualità degli ambienti interni), in particolare nel contesto del patrimonio storico costruito.

Al fine di approfondire ulteriormente l'analisi della bibliografia, i 471 articoli considerati in precedenza sono stati filtrati in modo da ottenere solo contributi che:

- Fossero incentrati sulla visualizzazione di dati 2D e/o 3D;
- Includessero casi studio specifici;
- Descrivessero in modo sufficientemente dettagliato il workflow, in modo da distinguere chiaramente strumenti open source e proprietari e le modalità di integrazione tra di essi.

Per visualizzazione di dati 3D si intende la possibilità di avere un riscontro di quanto rilevato dai sensori direttamente all'interno di modelli ispezionabili da remoto, non limitandosi quindi a grafici e tabelle inserite in specifiche dashboard 2D, ma consentendo una reale interazione da parte degli utenti.

Ciò ha portato alla selezione di 30 articoli che sono stati sintetizzati nella Tab. 1.3. Per ogni articolo sono stati indicati titolo, autori, anno, citazioni, il tipo di caso studio utilizzato e sono stati elencati i software, proprietari e gratuiti, che sono stati impiegati. L'ultima colonna è dedicata all'elenco dei dati monitorati. L'ordine nel quale sono elencati è cronologico e per numero di citazioni, aggiornate a settembre 2025.

	Titolo - Autori - Anno	Caso studio	Hardware - Software		Dati visualizzati
[121]	<i>"Low-Cost Internet of Things Solution for Building Information Modeling Level 3B—Monitoring, Analysis and Management."</i> Borkowski et al. 2024 Cit.: 2	Residenza unifamiliare.	Open source / Freeware: - Arduino IDE - C++ - MQTT protocol (Mosquitto) - Node-RED. Proprietari: - Autodesk Revit - BMP280 sensor - Dynamo - Microsoft Excel - NodeMCU V3 microcontroller.	2D	Visualizzazione dati sensori su dashboard 2D e nei parametri delle famiglie all'interno del modello BIM di: - Pressione - Temperatura.
[122]	<i>"Digital twin for indoor condition monitoring in living labs: University library case study."</i> Opoku et al. 2024 Cit.: 2	Living Lab, Kingswood, Western Sydney University, Australia.	Open source / Freeware: - C++ - LoRaWAN protocol - The Things Network Proprietari: - Autodesk Revit - IoT sensors di tipo "LoRA" AM107 and AM307 - TagoIO: IoT Cloud Platform.	2D 3D	Visualizzazione 3D nel modello BIM e grafici 2D (TagoIO) di: - CO ₂ - Livelli di illuminamento - Occupazione - Temperatura - TVOC - Umidità.
[123]	<i>"Modeling indoor thermal comfort in buildings using digital twin and machine learning."</i> ElArwady et al. 2024 Cit.:1	Edificio di Ingegneria Civile, Università del Cairo, Egitto.	Open source / Freeware: - Arduino IDE - Facebook Prophet - IFC - NeuralProphet - Python. Proprietari: - Autodesk Forge API - Autodesk Recap - Autodesk Revit - DHT22 sensor - ESP8266 microcontroller - Light Dependent Resistor (LDR) - Microsoft Azure SQL Database.	2D	Grafici 2D con indicato: - Livelli di illuminamento. - Previsioni sul comfort termico PMV e PPD - Temperatura - Umidità.
[124]	<i>"How to measure and control indoor air quality based on intelligent digital twin platforms: A case study in China."</i> Qian et al. 2024 Cit.: 0	Complesso residenziale, Wufu, Cina.	Open source / Freeware: - IFC - IfcOpenShell - InfluxDB - MySQL - WebGL2. Proprietari: - Autodesk Revit - BLE (Bluetooth) sensors - Laserscanner Trimble X7 - Trimble SketchUp.	2D 3D	Grafici 2D e viste 3D su piattaforma WebGL2 di: - CO ₂ - PM2.5 - Temperatura - TVOC - Umidità Con previsioni future.
[125]	<i>"Design of a Meaningful Framework for Time Series Forecasting in Smart Buildings."</i> Closson et al. 2024 Cit.: 0	Edificio per uffici, Grenoble, Francia.	Proprietari: - LoRaWAN Sensors.	2D	Grafici con rilevamento e previsione di: - CO ₂ - Controllo serramenti - HVAC consumi - Luci ambientali - PM - Temperatura

	Titolo - Autori - Anno	Caso studio	Hardware - Software	Dati visualizzati
				- Umidità.
[126]	“Occupant-Centric Digital Twin: A Case Study on Occupant Engagement in Thermal Comfort Decision-Making.” Sanaz Saadatifar et al. 2024 Cit.:0	Workspace, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA.	Open source / Freeware: - PythonPlotly Library - Google Colab platform. Proprietari: - LoRaWan-enabled IoT temperature sensors.	2D Grafici 2D e mappe termiche su apposita dashboard di: - Percentuale soddisfazione degli utenti - Temperatura.
[127]	“Predictive Analysis of a Building’s Power Consumption Based on Digital Twin Platforms.” Han et al. 2024 Cit.: 0	BIM Education Center, Changchun, Cina.	Open source / Freeware: - C++ - Unity. Proprietari: - Autodesk 3D Studio MAX - ZigBee.	2D Grafici 2D con: - Comparazione tra consumi reali e previsti - Diossido di carbonio - Energia consumata - Illuminazione, con possibilità di controllo da remoto - PM2.5 - Umidità - Temperatura.
[128]	“Digital twin with Machine learning for predictive monitoring of CO ₂ equivalent from existing buildings.” Arsiwala et al. 2023 Cit.: 36	Edificio residenziale, Stranmillis Gardens, Belfast, Irlanda del Nord.	Open source / Freeware: - Arduino IDE - Protocollo MQTT - Python - Visual studio. Proprietari: - Autodesk Revit - Microcontrollore ESP con sensori AHT20 e SGP30 - Microsoft Azure 3D Scene Studios - Microsoft Azure Digital Twin - Microsoft Azure Machine Learning - Microsoft Azure IoT hub - Microsoft Power Bi - Polycam.	2D 3D Visualizzazione dati nel modello 3D (SceneStudio) e Dashboard 2D (Power Bi) per il confronto tra i risultati attesi e quelli ottenuti di: - CO ₂ - Temperatura - Umidità.
[129]	“Web-Based Management of Public Buildings: A Workflow Based on Integration of BIM and IoT Sensors with a Web-GIS Portal.” Congiu et al. 2023 Cit.: 6	Centro di Ricerca per l'Energia Sostenibile Sotacarbo, Carbonia, Sardegna, Italia.	Open source / Freeware: - AUREE web GIS portal - Thingsboard IoT platform. Proprietari: - Autodesk Revit - Raspberry Pi 3B - ThreeJS graphic library.	2D Visualizzazione grafici 2D tramite la piattaforma Thingsboard di: - Temperatura - Umidità.
[130]	“A tool based on the industry foundation classes standard for dynamic data collection and automatic generation of building automation control networks.” Sanz-Jimeno R. et al. 2023 Cit.: 4	Edificio residenziale, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germania. Edificio residenziale, Vitoria-	Open source / Freeware: - BACN2BIM tool - BIM-SPEED Cloud platform - IFC - MQTT client - PostgreSQL - Thingsboard IoT platform Proprietari: - Autodesk Revit - TAC Xenta 100, pre-programmed zone controller.	2D Dati raccolti e gestiti tramite BACN2BIM tool e archiviati in ThingsBoard platform di: - CO ₂ - Consumi energetici - Indoor Air Quality (IAQ) - Presenza - Umidità

	Titolo - Autori - Anno	Caso studio	Hardware - Software	Dati visualizzati
		Gasteiz, Spain.		Possibilità di scaricare i dati in formato .csv tramite BIM-SPEED.
[131]	<i>"DanRETwin: A Digital Twin Solution for Optimal Energy Retrofit Decision-Making and Decarbonization of the Danish Building Stock."</i> Jradi et al. 2023 Cit.: 2	Edificio residenziale, Danimarca.	Open source / Freeware: - DanRETwin digital twin.	2D Grafici 2D e tabelle con indicati: - CO ₂ - Consumi energia per riscaldamento, elettricità e flusso d'acqua - Temperatura - Umidità.
[132]	<i>"Intelligent Monitoring Platform and Application for Building Energy Using Information Based on Digital Twin."</i> Li et al. 2023 Cit.: 2	Edificio per uffici, Hongkou, Shanghai.	Open source / Freeware: - C# - Unity. Proprietari: - 3DSMax - Designbuilder - UWB Sensors - ZigBee.	2D 3D Modello 3D e grafici con : - CO ₂ - Controllo dei consumi energetici - Illuminazione - Monitoraggio e controllo porte, finestre, ecc. - PM2.5 - Posizione e tracciamento utenti. - Temperatura - TVOC - Umidità.
[133]	<i>"Enabling an augmented building experience by encouraging user engagement."</i> Trombadore et al. 2023 Cit.: 0	Living Lab universitario, Firenze, Italia.	Open source / Freeware: - Snap4city: open source data management platform (uniFI).	2D L'app prototipo "Building environmental experience" consente di visualizzare: - Feedback utenti - Flussi termici attraverso gli elementi di involucro - Livelli di illuminamento Parametri esterni - PMV - Qualità dell'aria - Temperatura - Umidità.
[134]	<i>"MyComfort: An integration of BIM-IoT-machine learning for optimizing indoor thermal comfort based on user experience."</i> Kanna et al. 2022 Cit.: 15	"EngiMA's building", Casablanca, Marocco.	Open source / Freeware: - Aectech (Dynamo package) - Arduino IDE - REST API sviluppato in NodeJS - myComfort app. Proprietari: Autodesk Revit – Dynamo - ESP32 microcontroller - MongoDB - Sensore DHT11.	2D 3D Visualizzazione nel modello BIM di: - PMV - Temperatura - Umidità Visualizzazione 2D nella dashboard "MyComfort" di dati e previsioni sull'andamento delle temperature.
[135]	<i>"Advanced Data Systems for Energy Consumption Optimization and Air</i>	N/A	Open source / Freeware: - AdafruitIO Cloud - MQTT Broker	2D Visualizzazione dati tramite grafici nelle

	Titolo - Autori - Anno	Caso studio	Hardware - Software	Dati visualizzati
	<i>Quality Control in Smart Public Buildings Using a Versatile Open Source Approach.</i> Starace et al. 2022 Cit.: 10		<ul style="list-style-type: none"> - Python - SQL Server - ThingsBoard IO. Proprietari: <ul style="list-style-type: none"> - Arduino ATmega328P microcontrollore. - Wi-Fi ESP8266. 	Dashboard (AdafruitIO e ThingsBoard) di: <ul style="list-style-type: none"> - CO₂ - Consumo di energia (con previsioni) - Densità della polvere - Livelli di VOC - Temperatura - Umidità.
[136]	<i>"Leveraging Digital Twin for Sustainability Assessment of an Educational Building".</i> Tagliabue et al. 2021 Cit. :99	Laboratorio cognitivo eLUX, Università di Brescia, Italia.	Open source / Freeware: <ul style="list-style-type: none"> - Smart Campus Unibs eLUX app. Proprietari: <ul style="list-style-type: none"> - Autodesk Revit – Dynamo. 	2D 3D Visualizzazione dati 2D tramite app (eLUX) e all'interno del modello BIM di: <ul style="list-style-type: none"> - % materiali riciclati nei componenti edilizi (EPD) - Condizioni ambientali esterne (es. irraggiamento) - Comfort interno e di qualità dell'aria (CO₂, VOC, temperatura, umidità) - Comportamento energetico dell'edificio - Feedback da parte degli utenti sul comfort percepito.
[137]	<i>"Development of an IoT and BIM-based automated alert system for thermal comfort monitoring in buildings".</i> Valinejadshoubi et al. 2021 Cit.: 83	Edificio per uffici, Ville Saint Laurent, Quebec, Canada	Open source / Freeware: <ul style="list-style-type: none"> - C++ - Database MySQL. Proprietari: <ul style="list-style-type: none"> - Autodesk Revit – Dynamo - Flux: Server cloud - Microcontrollore Waspnote. 	2D 3D Visualizzazione nel modello BIM di: <ul style="list-style-type: none"> - Temperatura - Umidità Visualizzazione di allarmi in caso di superamento delle soglie (es. colorazione locali in caso di temperature elevate).
[84]	<i>"BIM and IoT Sensors Integration: A Framework for Consumption and Indoor Conditions Data Monitoring of Existing Buildings."</i> Desogus et al. 2021 Cit.: 58	Padiglione Mandolesi, Università di Cagliari, Italia.	Open source / Freeware: <ul style="list-style-type: none"> - API per la comunicazione con Autodesk Revit - ThingsBoard platform. Proprietari: <ul style="list-style-type: none"> - Autodesk Revit – Dynamo. 	2D 3D Grafici 2D tramite dashboard ThingsBoards e visualizzazione nel modello BIM di: <ul style="list-style-type: none"> - Contatori di energia elettrica. - Dati pompa di calore - Luminosità locali - Temperatura - Umidità.
[138]	<i>"IoT Open Source Architecture for the Maintenance of Building Facilities."</i> Villa et al. 2021 Cit.: 53	DISEG Laboratorio, Politecnico di Torino, Italia.	Open source / Freeware: <ul style="list-style-type: none"> - Arduino IDE - JavaScript - MySQL - Node-Red. - Protocollo MQTT Proprietari:	2D 3D Visualizzazione 2D (Node-RED dashboard) e 3D (Autodesk Forge) dei dati relativi ai fancoil: <ul style="list-style-type: none"> - Corrente assorbita - Fattore di Potenza

	Titolo - Autori - Anno	Caso studio	Hardware - Software	Dati visualizzati
			<ul style="list-style-type: none"> - Arduino - Autodesk Forge viewer - Autodesk Revit - DHT22 sensor - ESP8266 module - Raspberry Pi 3B model - RPIZCT4V3T2 board. 	<ul style="list-style-type: none"> - Potenza reale - Temperatura - Voltaggio Temperatura e umidità dei locali.
[139]	<i>"Dynamic Predicted Mean Vote: An IoT-BIM integrated approach for indoor thermal comfort optimization."</i> Zahid et al. 2021 Cit. :42	Edificio per uffici "EngiMA", Marocco.	Proprietari: <ul style="list-style-type: none"> - Arduino UNI - Autodesk Revit – Dynamo - DHT11 sensor. 	2D 3D Visualizzazione dati nel modello BIM di: <ul style="list-style-type: none"> - PMV - Temperatura - Umidità.
[140]	<i>"Development of indoor environmental quality index using a low-cost monitoring platform."</i> Mujan et al. 2021 Cit.: 33	Open office e aula studio, Faculty of Technical Science, Novi Sad, Serbia.	Open source / Freeware: <ul style="list-style-type: none"> - Arduino IDE - Blynk, open source IoT platform. Proprietari: <ul style="list-style-type: none"> - Adafruit TSL2561 - DFROBOT SKU: SEN0232 - Envira, prototipo basato su Arduino Mega 2560 Rev3 - ESP8266 - Sensirion SCD30 - Sensirion SGP30 - Sensirion SPS30 - Wind Sensor Rev. P. 	2D Visualizzazione 2D tramite piattaforma Blynk di: <ul style="list-style-type: none"> - Parametri IEQ: CO₂, livello sonoro, illuminamento, velocità dell'aria e pressione barometrica - Indice di comfort termico - Indice della qualità dell'aria - Indice acustico e di illuminamento.
[141]	<i>"An IoT measurement solution for continuous indoor environmental quality monitoring for buildings renovation."</i> Serroni et al. 2021 Cit.: 14	Asilo nido, Gdynia, Polonia.	Open source / Freeware: <ul style="list-style-type: none"> - API RESTful - Communication module PyCOM W01 - IFC - IfcOpenShell - MQTT - MySQL. Proprietari: <ul style="list-style-type: none"> - Software modellazione BIM - Prototipo sensori IoT IR "Comfort Eye". 	2D Termografie, mappe termiche e grafici con: <ul style="list-style-type: none"> - CO₂ - PMs - PMV - Temperatura dell'aria - Umidità relativa.
[142]	<i>"3D IoT System for Environmental and Energy Consumption Monitoring System."</i> Mataloto et al. 2021 Cit.: 14	Edificio scolastico, ISCTE-IUL University, Lisbona, Portogallo.	Open source / Freeware: <ul style="list-style-type: none"> - Arduino IDE - LoRaWan - MariaDB database - MQTT - MySQL - Node-RED - Python con librerie Pandas – Anaconda - The Things Network. Proprietari: <ul style="list-style-type: none"> - Arduino MKR1300 loRa - Sensore DHT22 - SCT-13-000. 	2D 3D Visualizzazione tramite dashboard e modello 3D di: <ul style="list-style-type: none"> - Consumi - Temperatura - Umidità. Comparazione dei consumi con esempi pratici al fine di sensibilizzare gli utenti. Survey comfort utenti su piattaforma web.

	Titolo - Autori - Anno	Caso studio	Hardware - Software	Dati visualizzati
[143]	<i>"A Smart Campus' Digital Twin for Sustainable Comfort Monitoring."</i> Zaballos et al. 2020 Cit.: 103	IoT institute, La Salle-URL Barcelona, Spagna.	Open source / Freeware: - MySQL - Python script Proprietari: - Amazon Rekognition - Autodesk Revit – Dynamo - Arduino UNO microcontroller - Microsoft Azure - Raspberry Pi.	2D 3D Visualizzazione nel modello BIM di: - HVAC - Luminosità - Occupazione - Amazon Rekognition - Qualità aria – CO ₂ - Soddisfazione utenti (survey).
[144]	<i>"An openBIM Approach to IoT Integration with Incomplete As-Built Data."</i> Moretti et al. 2020 Cit.: 52	Edificio, Università di Cambridge, Inghilterra.	Open source / Freeware: - BIMserver - IFC (IfcSharedFacilitiesElements) - IfcOpenShell-Python - JSON Proprietari: - Sensori wireless Monnit - Trend Controls Platform (BMS).	2D Grafici e tabelle (tramite piattaforma BMS Trend Controls) di: - CO ₂ - Temperatura - Umidità - Stato di apertura/chiusura delle finestre - Frequenza di vibrazione delle pompe HVAC Rilevamento delle anomalie per il monitoraggio del sistema HVAC.
[145]	<i>"A Visual and Persuasive Energy Conservation System Based on BIM and IoT Technology."</i> Wu et al. 2020 Cit.: 26	Sala conferenze, Università di Scienze e Tecnologie, Kaohsiung, Taiwan.	Open source / Freeware: - Piattaforma COZyBIM - SQL Proprietari: - Arduino YUN - Autodesk Revit - Revit API - Sensore DHT22 - Wio node (Wi-Fi node).	2D 3D Visualizzazione nel modello BIM e grafici / tabelle con indicati: - Qualità dell'aria - Temperatura - Umidità - Calcolo del PMV in COZyBIM.
[146]	<i>"Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings"</i> . Khajavi et al. 2019 Cit.: 328	Edificio per uffici, Università Aalto, Helsinki, Finlandia.	Open source / Freeware: - BLE (Bluetooth Low Energy) technology - Python - Raspbian Proprietari: - Raspberry Pi 3B+ - Texas Instruments (TI) Sensortag CC2650.	2D Grafici 2D con: - Livelli di illuminazione - Temperatura - Umidità relativa.
[147]	<i>"A framework for integrating BIM and IoT through open standards."</i> Dave et al. 2018 Cit.: 198	Edificio, Università Aalto, Helsinki, Finlandia.	Open source / Freeware: - App Aalto Space - IFC - IfcOpenShell - Python - O-MI e O-DF (Open Messaging Interface e Open Data Format) - Otaniemi3D Proprietari: - Autodesk Revit.	2D 3D Visualizzazione tramite Otaniemi3D di: - Analisi dati - CO ₂ - Occupazione e valutazione degli spazi (aule) - Planimetrie e mappe di calore - Posizione dei sensori - Temperatura - Umidità.
[148]	<i>"An Automated IoT Visualization BIM Platform for Decision"</i>	Laboratorio Ingegneria, National	Open source / Freeware: - Python Proprietari:	2D 3D Grafici 2D con: - Temperatura - Umidità

	Titolo - Autori - Anno	Caso studio	Hardware - Software	Dati visualizzati
	<i>Support in Facilities Management.</i> Chang et al. 2018 Cit.: 70	Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan.	- Arduino Mega 2560 R3 microcontroller board - Autodesk Revit – Dynamo - DHT11 sensor.	Visualizzazione 3D nel modello BIM della PMV, calcolata con codici Python e visualizzata tramite Dynamo.
[149]	<i>"BIM- and IoT-based monitoring framework for building performance management."</i> Kang et al. 2018 Cit.: 29	Edificio per uffici, Pechino, Cina.	Open source / Freeware: - C/C++ - IFC - MQTT - Python. Proprietari: - Arduino -Atmel AVR microcontroller - Autodesk Revit - Chronograf - DHT11 sensor - InfluxDB - MongoDB - PT550 sensor - ZigBee.	2D Dashboard con visualizzati: - Illuminazione - Temperatura - Umidità.

Tab. 1.3: Approfondimento articoli selezionati

Dalla Tab. 1.3 emergono alcune considerazioni, elencate di seguito:

- La quasi totalità dei lavori analizzati propone workflow ibridi che prevedono l'utilizzo misto di software proprietari (tipicamente: Autodesk Revit per la modellazione BIM e Microsoft Azure per la rappresentazione dei dati) associati a software open source (Arduino IDE per la programmazione dei sensori, linguaggio di programmazione Python e in minor misura C++, The Things Network, Thingsboard e protocolli MQTT per la visualizzazione e lo stream di dati). Su 30 articoli, tutti includono visualizzazioni dei dati 2D tramite dashboard sia gratuite che a pagamento, mentre solo la metà li rappresenta anche in 3D;
- Quattro articoli fanno specifici riferimenti ad approcci esclusivamente open source/openBIM, ma nessuno di questi prevede una visualizzazione dei dati 3D all'interno di modelli ispezionabili (Fig. 1.48);
- Sei articoli utilizzano il formato di interscambio IFC, prevalentemente per estrarre le geometrie degli edifici (ad esempio dimensioni e collocazione dei locali monitorati) e per collegare il modello BIM alla sensoristica IoT, assegnando ai sensori (IfcSensor) e ai locali (IfcSpace) dei "tag" all'interno dei Pset. Grazie a questi tag è possibile associare le rilevazioni di un determinato sensore a uno specifico elemento collocato all'interno del modello BIM, rendendo così possibile l'immediata lettura del valore misurato;
- In quattro articoli il toolkit IfcOpenShell viene utilizzato per riconfigurare e integrare le informazioni contenute negli IFC di partenza, in modo da adattarli alle esigenze del workflow e facilitando la trasmissione verso database o sistemi esterni;
- Autodesk Revit viene utilizzato sia per la realizzazione del modello (17 articoli) che per la visualizzazione direttamente all'interno dello stesso dei dati, grazie all'utilizzo del plug-in Dynamo per l'aggiornamento in tempo reale del modello (10 articoli). L'utilizzo di questo tipo di software ne limita però la diffusione ai soli possessori delle licenze proprietarie;

- Per visualizzazioni 3D dei dati, diversi studi ricorrono a strumenti utilizzati tipicamente nel settore videoludico e cinematografico, come ad esempio Unity [150] e Autodesk 3ds Max [151].
- In ambito hardware Arduino e Raspberry Pi sono gli strumenti più utilizzati per la raccolta di dati dai sensori (principalmente DHT11 o DHT22 per temperatura e umidità);
- I dati più rappresentati riguardano temperatura, umidità e concentrazione di CO₂ (Fig. 1.49);
- Solo quattro articoli includono la possibilità di avere un feedback da parte degli utenti. Di questi, due hanno anche un'integrazione con modelli 3D e soltanto uno visualizza il modello 3D e i sondaggi all'interno della stessa applicazione (Otaniemi3D, Università Aalto di Helsinki);
- Non emergono contributi focalizzati sul monitoraggio energetico/ambientale in applicazioni HBIM, a conferma della limitata maturità del tema nel contesto del patrimonio storico.

La visualizzazione dello stream di dati nei modelli BIM in modo del tutto open source, senza dover necessariamente ricorrere a software proprietari, risulta quindi ancora carente, mentre l'approccio open source è prevalentemente confinato a sperimentazioni accademiche [142], [145], [147]. Solo alcuni istituti di ricerca hanno sviluppato specifiche applicazioni in grado di consentire agli utenti la visualizzazione dello stato delle aule in tempo reale, sia in termini di comfort che di occupazione. Questi risultati non sono stati però sviluppati ed estesi al di fuori dei contesti accademici, in modo da poterne usufruire in maniera sistematica e scalabile anche in altri ambiti.

Inoltre, la creazione dei modelli informativi BIM è demandata ai soli software proprietari, in particolare ad Autodesk Revit.

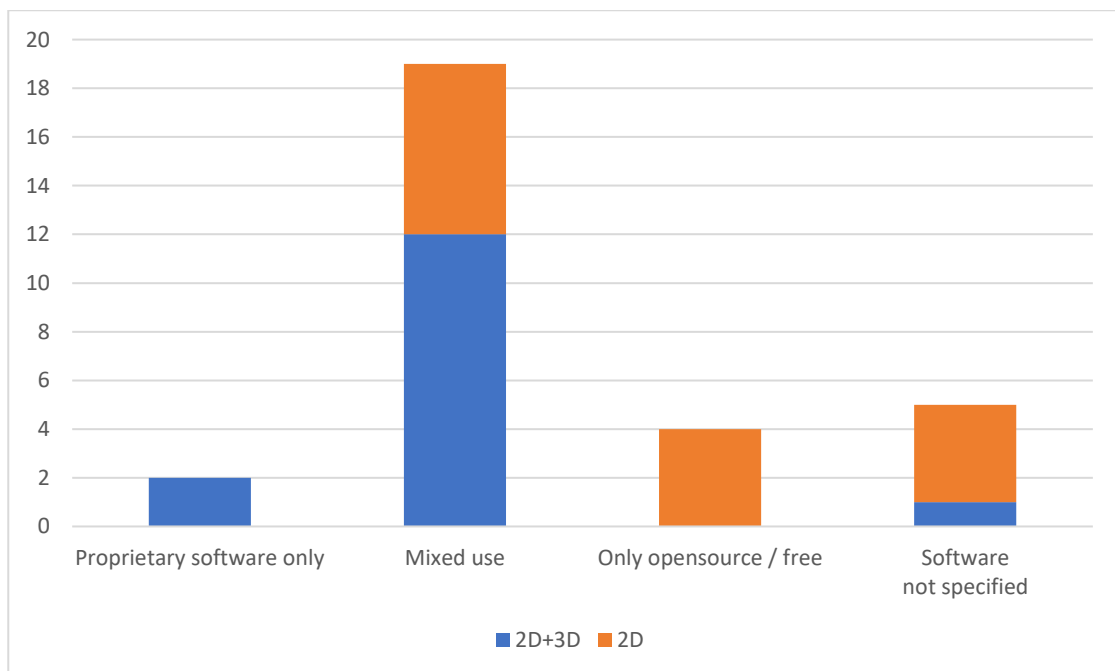


Fig. 1.48: Software utilizzati e visualizzazione dati

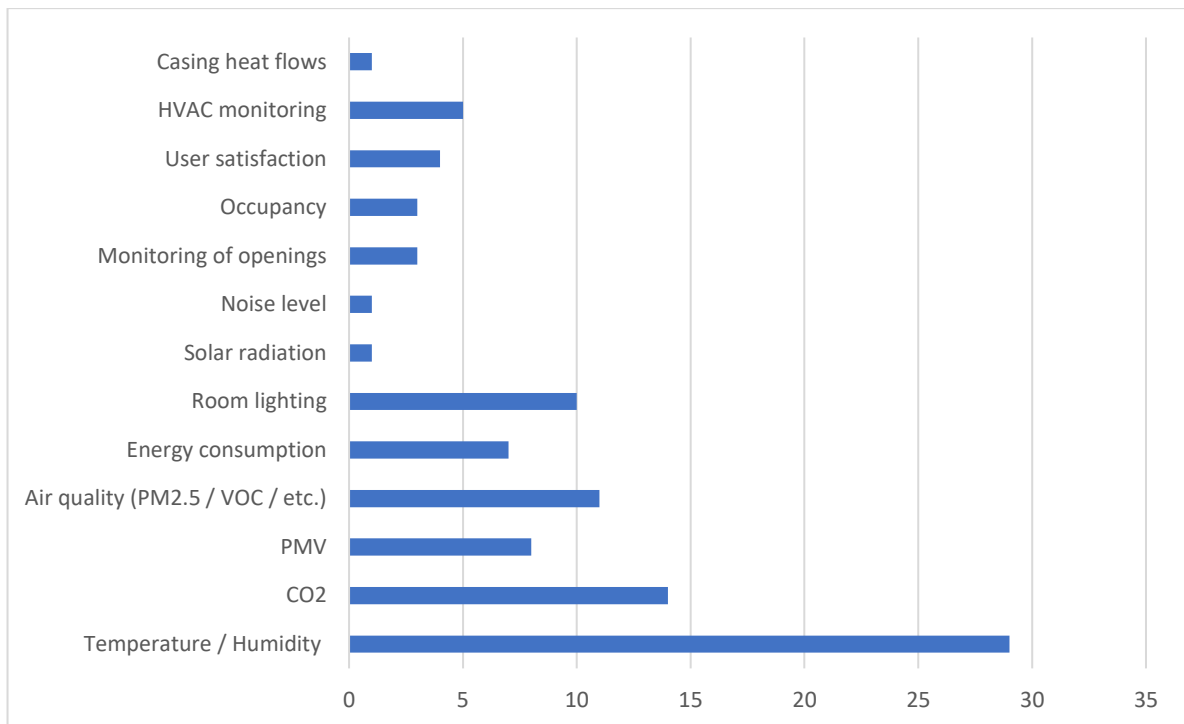


Fig. 1.49: Dati monitorati

In conclusione, la letteratura attuale mostra una prevalenza di soluzioni basate su dashboard bidimensionali, con una limitata integrazione con metodologie open source. Nella quasi totalità dei casi esaminati, infatti, si ricorre all'interno del processo a software proprietari sia per quanto riguarda la visualizzazione che, soprattutto, nella fase di gestione e analisi dei dati. Queste lacune si riflettono anche nell'edilizia storica.

La letteratura inerente l'HBIM si concentra prevalentemente sulla modellazione geometrica e sulla documentazione storica, mentre sono ancora limitati gli studi che ne esplorano le potenzialità per l'analisi prestazionale degli edifici storici. Tale carenza è particolarmente evidente se si considerano approcci basati su strumenti open source e openBIM, che, pur offrendo vantaggi in termini di accessibilità, trasparenza e replicabilità, risultano ancora poco utilizzati.

La presente ricerca intende contribuire a colmare questa lacuna, sperimentando un flusso di lavoro aperto per integrare dati IoT e analisi termiche in ambiente HBIM.

2 METODOLOGIA DELLA RICERCA

Dopo l'approfondimento sugli strumenti e sui concetti di base, il presente capitolo descrive la metodologia di ricerca adottata. Vengono presentate le procedure impiegate per le analisi termiche, le strategie per affrontare le complessità operative degli edifici sottoposti a vincolo, nonché i criteri di selezione e il trattamento dei casi studio.

I casi studio sono stati utilizzati per applicare i tool introdotti e per verificare la replicabilità e l'efficacia del flusso di lavoro proposto, finalizzato alla raccolta, all'elaborazione e alla visualizzazione in tempo reale di stream di dati all'interno dei modelli, mediante strumenti open source e standard openBIM.

2.1 Analisi termiche negli edifici storici

L'analisi termica del patrimonio edilizio storico rappresenta oggi una delle sfide più complesse e, al tempo stesso, più rilevanti nell'ambito della sostenibilità e della conservazione. Operare in un contesto come quello degli edifici storici comporta infatti numerose criticità [152]. Innanzitutto, trattandosi di manufatti datati, è frequente disporre di informazioni limitate sul costruito, soprattutto per quanto riguarda gli impianti. La geometria generalmente risulta complessa e irregolare, mentre la struttura è generalmente il risultato di lavorazioni avvenute in epoche differenti, con il conseguente impiego di materiali e tecniche costruttive eterogenei. Un ulteriore aspetto riguarda la scarsa prestazione termica dell'involucro rispetto agli standard contemporanei: molti edifici storici sono privi di isolamento e raramente dotati di barriere al vapore, consentendo sia all'acqua meteorica sia all'umidità di risalita di penetrare nei componenti dell'involucro fino a raggiungere gli ambienti interni.

Nel tentativo di rendere tali edifici maggiormente fruibili, adeguamenti eccessivamente orientati alle aspettative moderne possono comportare effetti indesiderati sulla struttura esistente. In edifici caratterizzati da un involucro scarsamente isolato, l'imposizione di condizioni termoigrometriche costanti, ad esempio il mantenimento di una temperatura interna pari a 21 °C per l'intero arco dell'anno, può generare conseguenze rilevanti, talvolta irreversibili, oltre a un significativo incremento dei consumi energetici. L'aria riscaldata, che presenta generalmente un contenuto di umidità più elevato, a contatto con superfici murarie fredde può favorire la formazione di condensa sulle superfici interne dell'involucro, in particolare durante le stagioni di transizione come la primavera o l'inizio dell'estate. In tali condizioni, interventi finalizzati al miglioramento del comfort medio degli ambienti possono paradossalmente accelerare fenomeni di degrado dell'edificio e arrecare danni agli apparati decorativi o agli oggetti conservati, soprattutto nelle zone maggiormente esposte a condizioni microclimatiche più severe rispetto ai valori medi.

Il trascorrere del tempo comporta inoltre un progressivo aumento della fragilità dei materiali costitutivi degli edifici storici, a causa di fenomeni di degrado o di danni pregressi. Le superfici, che generalmente rappresentano gli elementi a più alto valore culturale e storico-artistico, richiedono pertanto particolari attenzioni in termini di conservazione. Ne consegue che le

indagini sulla consistenza materica dell'edificio debbano spesso essere condotte mediante tecniche non distruttive, con una conseguente maggiore difficoltà nella ricostruzione della reale stratigrafia e del comportamento costruttivo dell'edificio, nonché nella pianificazione delle strategie di intervento più appropriate [153].

Per garantirne l'uso continuativo, gli edifici storici devono essere inoltre adattati ad affrontare le sfide sociali attuali ed emergenti [154], tra cui (Fig. 2.1):

- La conservazione del patrimonio culturale e il mantenimento delle caratteristiche e dell'identità originarie;
- La trasformazione dei siti storici in poli attrattivi per il turismo, generando reddito e posti di lavoro;
- L'adattamento degli edifici a nuovi usi e funzioni che richiedono strategie di retrofitting energetico per soddisfare gli standard odierni di comfort termico, qualità ambientale interna (IEQ) ed efficienza energetica;
- La gestione degli impatti del cambiamento climatico, in particolare del riscaldamento globale e degli eventi meteorologici estremi;
- L'attuazione di strategie per mitigare effetti legati all'aumento dei flussi turistici.

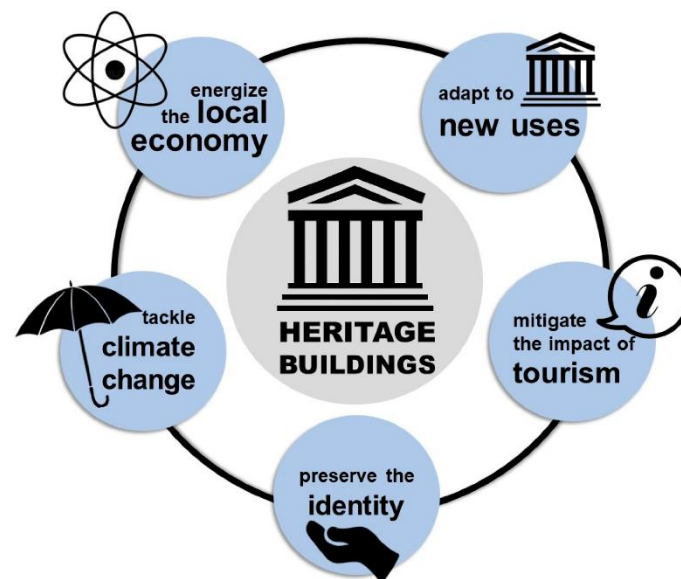


Fig. 2.1: Sfide per gli edifici storici (fonte: Pereira et al., 2021)

Negli ultimi anni, l'atteggiamento delle istituzioni e degli enti preposti alla conservazione è cambiato radicalmente [153]. Se in passato le esenzioni normative erano considerate uno strumento di protezione, oggi sono talvolta percepite come un potenziale rischio, in quanto possono contribuire a mantenere gli edifici storici in condizioni di inefficienza energetica rispetto al restante patrimonio edilizio. Parallelamente, le riqualificazioni energetiche sono sempre più interpretate come strumenti di salvaguardia, poiché l'adeguamento funzionale e prestazionale degli edifici storici ne favorisce la continuità d'uso, riducendo il rischio di abbandono o demolizione [155].

Questo cambiamento di prospettiva ha portato in primo piano i temi relativi all'idoneità delle ristrutturazioni negli edifici storici e tradizionali, stimolando nuove ricerche e approfondimenti

mirati a valutare il bilanciamento tra le prestazioni energetiche e la conservazione dei valori culturali.

In tale contesto emerge la necessità di trovare un equilibrio tra tre fattori fondamentali:

- Tutela delle opere e delle strutture storiche;
- Benessere e comfort degli utenti;
- Riduzione dei consumi energetici.

Diversi studi hanno dimostrato come tale equilibrio possa essere perseguito attraverso approcci mirati. Il lavoro di Kramer [156] relativo al museo Hermitage di Amsterdam ha evidenziato l'impatto delle classi climatiche ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) sui consumi energetici e sulle fluttuazioni microclimatiche interne, sottolineando come un allentamento controllato dei parametri conservativi possa ridurre sensibilmente i consumi senza compromettere la salvaguardia delle collezioni. Analogamente, la review condotta da Martinez-Molina [157], offre un'ulteriore panoramica che sottolinea come i progetti di retrofit debbano trovare un equilibrio fra efficienza, comfort e conservazione.

Le analisi energetiche applicate al patrimonio edilizio storico dimostrano quindi che l'obiettivo di migliorare le prestazioni e ridurre i consumi non può essere perseguito con le medesime strategie utilizzate per gli edifici contemporanei. Le caratteristiche costruttive, i vincoli normativi e la necessità di rispettare il valore culturale impongono un approccio calibrato, che privilegi il compromesso tra tutela e prestazioni.

Da questa consapevolezza deriva il crescente interesse per lo studio delle condizioni microclimatiche e per la loro rappresentazione integrata nei modelli informativi, elemento che assume un ruolo centrale non solo per il benessere degli utenti, ma soprattutto per la conservazione a lungo termine delle opere d'arte e delle superfici decorate custodite negli edifici storici.

2.1.1 Condizioni microclimatiche per la conservazione del patrimonio artistico-culturale

La conservazione a lungo termine del patrimonio artistico e culturale custodito negli edifici storici richiede un controllo attento e consapevole delle condizioni microclimatiche interne. A differenza degli edifici ordinari, dove il comfort percepito dagli utenti costituisce generalmente l'obiettivo principale, nel caso del patrimonio culturale è necessario attribuire priorità alla tutela dell'edificio stesso e delle collezioni che esso ospita [158].

Negli ultimi anni si è intensificato il dibattito relativo ai valori ottimali di temperatura e umidità relativa in musei, archivi e biblioteche, alimentato anche dal desiderio delle istituzioni culturali di diventare più sostenibili dal punto di vista ambientale e di contenimento dei consumi energetici. Diversi enti e normative hanno affrontato il tema, cercando di assegnare dei valori standard relativi in particolare a livelli di temperatura, umidità, illuminazione e qualità dell'aria, che potessero coprire il maggior numero di casistiche. Ad esempio, una delle norme di riferimento, la UNI EN 15757 [159], specifica i livelli di temperatura e umidità relativa ottimali al fine di limitare i danni fisici che il clima causa ai materiali organici igroscopici conservati in ambienti stabili per lunghi periodi (superiori a un anno). La metodologia non si basa sull'imposizione di valori assoluti predefiniti, bensì sull'analisi del clima storico

dell'ambiente e sulla valutazione delle condizioni di conservazione degli oggetti più vulnerabili o di maggior valore. La decisione sulla tollerabilità delle condizioni microclimatiche è quindi fondata sull'innocuità (o meno) delle condizioni esistenti, piuttosto che su un set di parametri ideali universali. Tale approccio consente generalmente di individuare intervalli di temperatura e umidità relativa più flessibili rispetto ai valori tradizionalmente considerati ottimali, permettendo una riduzione del livello di controllo ambientale richiesto e, di conseguenza, dei consumi energetici.

D'altro canto, un altro testo di riferimento per quanto riguarda il controllo degli ambienti interni nel caso di musei, gallerie d'arte, ecc. redatto dall'associazione americana ASHRAE [160] affronta il tema in maniera molto differente. In questo caso vengono definiti degli scenari con specifici valori e tolleranze, sulla base di ambienti climaticamente controllati, indipendenti quindi dal clima esterno, cosa invece sulla quale si basava la normativa vista precedentemente. Nello specifico, ASHRAE definisce 5 classi di controllo (AA, A, B, C, D) con tolleranze esplicite, ad esempio la Classe A prevede valori di umidità relativa al $50\% \pm 5\%$ e temperatura tra 15 e 25 °C, mentre la classe C ha tolleranze molto più ampie, tra 25 e 75% di umidità relativa e temperature raramente superiori a 30°C. Più ci si avvicina alle condizioni ottimali (Classe AA/A) minore è il rischio di degrado, ma più elevati sono i consumi energetici e i costi di gestione.

Come verrà approfondito nella Tab. 2.4, sono numerose le normative e le linee guida che forniscono indicazioni sulle condizioni ideali degli ambienti interni, generando però al contempo alcune criticità applicative. Una delle principali problematiche riscontrate dagli operatori riguarda la mancanza di coerenza metodologica tra i diversi riferimenti normativi nella determinazione dei parametri microclimatici e di qualità dell'aria interna più adeguati alla conservazione del patrimonio culturale [161].

In tale contesto, le problematiche affrontate dai professionisti della conservazione richiedono approcci in cui le caratteristiche uniche del luogo, dei materiali e delle modalità d'uso guidino il processo decisionale [162]. La conservazione del patrimonio non si fonda più esclusivamente sul mantenimento di valori rigidi e standardizzati, ma su un'analisi storica, su un monitoraggio continuo delle condizioni ambientali e su strategie preventive che tengano conto della natura dei materiali e delle peculiarità dell'edificio.

Per questo motivo, risulta fondamentale sviluppare adeguati sistemi di monitoraggio integrati in piattaforme digitali, capaci di raccogliere, elaborare e visualizzare in modo strutturato i dati ambientali, al fine di supportare decisioni consapevoli e calibrate a tutela del patrimonio.

2.1.2 Calcolo del comfort percepito

Un ulteriore aspetto rilevante nella gestione del patrimonio storico, oltre alla tutela dell'integrità dello stesso e alla riduzione dei consumi energetici, è quello relativo al comfort percepito all'interno degli ambienti da parte degli utenti. Sebbene negli interventi di conservazione la priorità sia attribuita alla salvaguardia delle strutture e delle opere custodite, il benessere degli occupanti non può essere trascurato, soprattutto nei casi in cui l'edificio sia destinato a usi continuativi o aperto al pubblico.

Per la determinazione dei livelli di comfort, per diversi decenni è stato ampiamente utilizzato il metodo di calcolo ideato da Povl Ole Fanger, i cui indici PMV (Predicted Mean Vote, voto medio previsto) e PPD (Predicted Percentage Dissatisfied, percentuale di insoddisfatti) per la

valutazione del comfort termico, oltre alle unità “olf” e “decipol” per la qualità dell'aria interna, costituiscono ancora oggi la base di numerosi standard relativi al clima interno [163]. Nel 1970 Fanger pubblicò il volume *Thermal Comfort* [164], il quale diventò il testo di riferimento per la diffusione dei calcoli sul comfort percepito basati su PMV e PPD, e successivamente adottato da standard internazionali quali ISO 7730 [165] e ASHRAE 55 [166]. Il PMV rappresenta il voto medio atteso che un gruppo di persone esprimerebbe su una scala termica a sette punti, compresa tra -3 (molto freddo) a 0 (neutrale) e +3 (molto caldo). Il modello si basa su un bilancio energetico del corpo umano e utilizza sei variabili, di cui quattro ambientali e due individuali.

Variabili ambientali:

- Air temperature (T_a); temperatura dell'aria, espressa in [°C];
- Mean radiant temperature (T_r); temperatura media radiante dell'ambiente circostante, espressa in [°C];
- Air velocity (V_a); velocità dell'aria, espressa in [m/s];
- Relative humidity (RH); umidità relativa, espressa in [%].

Variabili individuali:

- Clothing insulation (I_{cl}); resistenza termica degli indumenti [clo]. I valori clo rappresentano l'isolamento fornito dagli indumenti. L'abbigliamento tipico da interni va da 0.5 a 1.0 clo, mentre gli indumenti invernali più pesanti possono arrivare a 1.5-2.0 clo (1 clo = 0,155 m²K/W);
- Metabolic rate (M); attività metabolica [met]. I valori Met aumentano con il livello di attività. Ad esempio, stare seduti tranquillamente ha un met di circa 1.0, mentre camminare o fare un'attività fisica moderata ha un met di circa 2.0;

Dalla norma ISO 7730, la formula per il calcolo del PMV è la seguente (Fig. 2.2):

$$PMV = (0,303 \exp(-0,036M) + 0,028)\{(M - W) - 305 \\ * 10^{-3}[5733 - 6,99 * (M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] - 1,7 \\ * 10^{-5} * M * (5867 - p_a) - 0,0014 * M * (34 - t_a) - 3,96 * 10^{-8} \\ * f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} * h_c * (t_{cl} - t_a)\}$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 * (M - W) \\ - I_{cl}\{3,96 * 10^{-8} * f_{cl} * [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} * h_c * (t_{cl} - t_a)\}$$

$$h_{cl} = \begin{cases} 2,38 * |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{per } 2,38 * |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 * \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 * \sqrt{v_{ar}} & \text{per } 2,38 * |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 * \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 I_{cl} & \text{per } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 * K W^{-1} \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & \text{per } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 * K W^{-1} \end{cases}$$

Fig. 2.2: Calcolo PMV

Dove:

- M è l'energia metabolica prodotta (Wm^{-2}).
- W è la potenza prodotta (Wm^{-2}).
- I_{cl} è la resistenza termica dell'abbigliamento (m^2KW^{-1}).
- f_{cl} è il fattore di superficie dell'abbigliamento.
- t_a è la temperatura dell'aria ($^{\circ}\text{C}$).
- \dot{t}_r è la temperatura media radiante ($^{\circ}\text{C}$).
- v_{ar} è la velocità relativa dell'aria (m s^{-1}).
- p_a è la pressione parziale di vapore acqueo (Pa).
- h_c è il coefficiente di scambio termico per convezione ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).
- t_{cl} è la temperatura media superficiale del vestiario ($^{\circ}\text{C}$).

Se, ad esempio, abbiamo:

- t_a , temperatura dell'aria, pari a 21.7°C , e questa coincide con la \dot{t}_r , temperatura media radiante.
- v_{ar} , velocità dell'aria, pari a 0.1 m/s .
- rh , umidità relativa, necessaria per ricavare il valore di pressione parziale p_a ($rh \times 10 * \text{math.exp}(16.6536 - 4030.183 / (t_a + 235)) / 1000$), pari al 56.9% .
- met , attività metabolica, necessaria per ricavare il valore di energia metabolica M ($met * 58.15$), pari a 1.2 (attività da ufficio).
- clo , resistenza termica degli indumenti, pari a 0.5 (abbigliamento tipico da interni).

Il PMV risulterà pari a -0.77 . L'utente avvertirà quindi, secondo la formula di Fanger, una leggera sensazione di fresco. I valori ritenuti ottimali sono quelli compresi tra -0.5 e $+0.5$. Strettamente correlato al PMV troviamo il PPD, ovvero la percentuale di insoddisfatti delle condizioni climatiche riscontrate (Fig. 2.3).

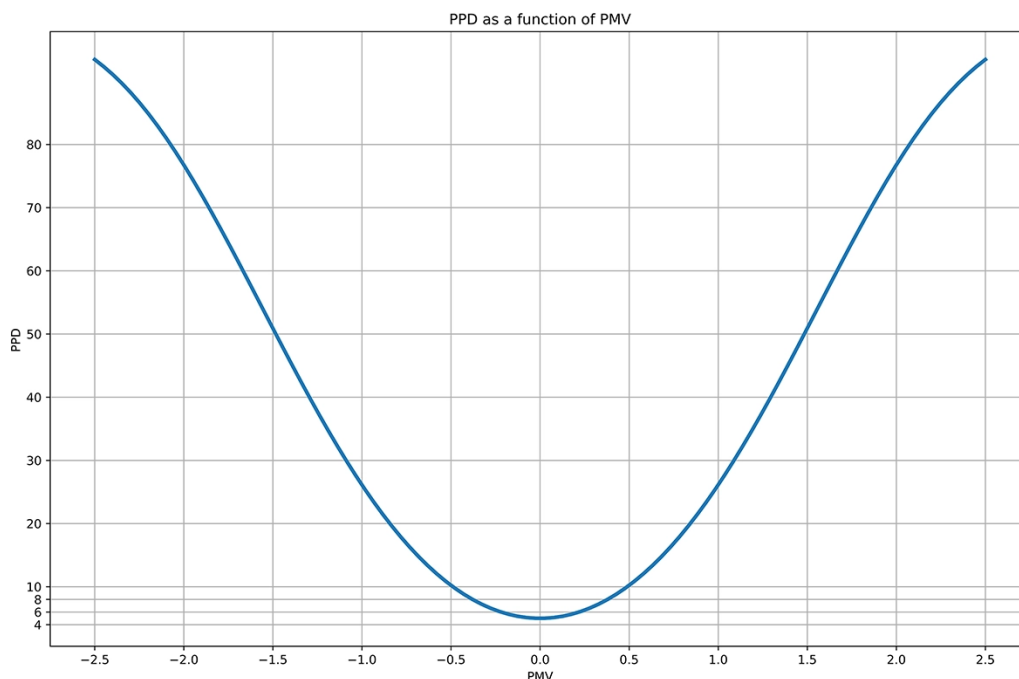


Fig. 2.3: Relazione tra PMV e PPD (fonte: www.quadco.engineering)

Il PPD è strettamente collegato al PMV e stima la percentuale di persone che sarebbero insoddisfatte di un determinato ambiente termico. La relazione tra PMV e PPD non è di tipo lineare: anche in un ambiente ideale ($PMV=0$), una quota minima di individui potrebbe risultare comunque insoddisfatta, avvertendo troppo caldo o troppo freddo. In generale, l'obiettivo è quello di mantenere il PMV tra -0,5 e +0,5, che corrisponde a un PPD inferiore al 10%, garantendo così che la maggior parte delle persone si senta a proprio agio.

A oltre quarant'anni dalla sua formulazione, il modello di Fanger, pur rimanendo tuttora uno strumento ampiamente utilizzato per la valutazione del comfort termico, presenta alcune limitazioni. Esso è stato sviluppato sulla base di soggetti adulti in condizioni di laboratorio controllate e non tiene conto della variabilità culturale, climatica e comportamentale. In particolare, il modello non considera adeguatamente i meccanismi di adattamento degli occupanti, ossia la capacità delle persone di modificare abbigliamento, comportamento o aspettative in funzione delle condizioni ambientali, cosa che avviene comunemente negli edifici naturalmente ventilati o parzialmente climatizzati.

Per superare tali limiti sono stati sviluppati approcci alternativi, tra cui il modello di comfort adattivo [167], che integra la variabilità climatica esterna e i comportamenti degli utenti nel processo di valutazione.

Un primo passo verso il miglioramento di questi modelli adattivi può essere effettuato mediante l'introduzione del feedback diretto degli utenti sulle condizioni climatiche percepite negli spazi occupati. Attraverso una serie di sondaggi puntuali e costanti, è infatti possibile generare dataset sufficientemente estesi da affiancare ai dati oggettivi rilevati dai sensori ambientali.

L'utilizzo di apposite applicazioni digitali consentirebbe di raccogliere informazioni con una frequenza adeguata alla costruzione di modelli di serie temporali degli ambienti interni. Questi modelli potrebbero essere utilizzati per rilevare le anomalie dell'edificio, supportare strategie di regolazione adattiva o essere utilizzati per raccomandare gli spazi che meglio corrispondono alle preferenze di comfort di ciascun occupante [168].

L'integrazione tra dati oggettivi (sensoristica IoT), modelli teorici (PMV/PPD) e feedback soggettivo rappresenta pertanto un passaggio fondamentale verso sistemi di monitoraggio avanzati e dinamici, particolarmente rilevanti nel contesto del patrimonio storico, dove il bilanciamento tra conservazione e comfort richiede strumenti di supporto decisionale fondati su dati misurabili e contestualizzati.

2.2 Normative e leggi

Prima di presentare le normative di riferimento per i temi oggetto della presente ricerca, si ritiene opportuno richiamare brevemente l'impostazione generale del sistema della normazione tecnica.

Con il termine norme tecniche si fa generalmente riferimento a documenti elaborati da organismi di normazione riconosciuti a livello internazionale, europeo o nazionale, che definiscono regole, requisiti o linee guida condivise relative a prodotti, processi, servizi o metodi.

Nel sistema della normazione si distinguono tre livelli principali [169]:

Questo quadro generale costituisce il riferimento entro cui si inseriscono le normative analizzate nei paragrafi successivi, con particolare attenzione ai temi della conservazione, del comfort ambientale, dell'efficienza energetica e dell'interoperabilità informativa.

2.2.1 Normative e leggi in ambito BIM

L'adozione del Building Information Modeling all'interno di un processo non può prescindere da solidi riferimenti normativi, che assicurino la coerenza delle procedure informative e la qualità dei modelli digitali prodotti. In questo contesto, la prima norma da citare è la ISO 19650, entrata in vigore nel 2019, che ha contribuito a delineare gli scenari normativi a livello internazionale, comunitario e dei singoli stati. Tratta di: "Organizzazione e digitalizzazione delle informazioni relative all'edilizia e alle opere di ingegneria civile, incluso il Building Information Modelling (BIM) - Gestione informativa mediante il Building Information Modelling" [170]. Può essere definita come lo standard internazionale di riferimento per la gestione delle informazioni sull'intero ciclo di vita di un bene costruito, utilizzando il BIM.

In Tab. 2.1, riportata di seguito, vengono riassunte le parti che costituiscono la serie ISO 19650:

Codice	Anno	Titolo	Note
UNI EN ISO 19650-1	2019	Organizzazione e digitalizzazione delle informazioni relative all'edilizia e alle opere di ingegneria civile, incluso il Building Information Modelling (BIM) - Gestione informativa mediante il Building Information Modelling. Parte 1: Concetti e principi.	Definisce i principi di base e la terminologia per la gestione delle informazioni nel BIM. Costituisce la base concettuale dell'intera serie. <i>In vigore.</i>
UNI EN ISO 19650-2	2019	Parte 2: Fase di consegna dei cespiti immobili.	Stabilisce come pianificare, organizzare e scambiare le informazioni nella fase di progettazione e costruzione. Aiuta il richiedente alla definizione dei requisiti informativi. <i>In vigore.</i>
UNI EN ISO 19650-3	2021	Parte 3: Fase gestionale dei cespiti immobili.	Fornisce processi e criteri dettagliati per le decisioni nel processo di scambio di informazioni all'interno dell'information management. <i>In vigore.</i>
UNI EN ISO 19650-4	2022	Parte 4: Scambio di informazioni.	Specifica requisiti e procedure per lo scambio standardizzato di informazioni tra attori diversi. Promuove interoperabilità. <i>In vigore.</i> È applicabile a qualsiasi scambio d'informazione nelle fasi di progetto (ISO 19650 - Parte 2) e negli eventi in-use (ISO 19650 - Parte 3). Tutti gli sviluppi e gli scambi d'informazione dovrebbero essere eseguiti sotto gli adeguati controlli di sicurezza (ISO 19650 - Parte 5). <i>In vigore.</i>
UNI EN ISO 19650-5	2020	Parte 5: Approccio orientato alla sicurezza per la gestione informativa.	Introduce linee guida per la sicurezza informativa, protezione dei dati sensibili e controllo degli accessi ai modelli. <i>In vigore.</i>
UNI EN ISO 19650-6	2025	Parte 6: Informazioni sulla salute e sulla sicurezza.	Specifica i concetti e i principi per la classificazione, la condivisione e la fornitura di informazioni sulla salute e sulla sicurezza in modo collaborativo, per garantire i benefici economici, ambientali e sociali. <i>In vigore.</i>

Tab. 2.1: UNI EN ISO 19650

La ISO 19650, anche se ultima nata, costituisce oggi la norma primaria, di riferimento per tutte le altre anche già esistenti. La UNI 11337, pubblicata in anni precedenti, ne è diventata l'allegato nazionale per quanto riguarda la normativa italiana.

Essa è costituita dalle seguenti parti, riportate in Tab. 2.2:

Codice	Anno	Titolo	Note
UNI 11337-1	2017	Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni. Parte 1: Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi.	Definisce i concetti di <i>dato</i> , <i>informazione</i> e <i>contenuto informativo</i> , la modalità di trasmissione e rappresentazione attraverso elaborati e modelli, il significato di oggetti digitali e strutture informative di prodotti e processi. <i>In vigore.</i>
UNI/TR 11337-2	2021	Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni. Parte 2: Flussi informativi e processi decisionali nella gestione delle informazioni da parte della committenza	Fornisce linee guida per i flussi informativi e le decisioni della committenza nei processi BIM, in conformità al quadro generale previsto dalla serie UNI EN ISO 19650. <i>In vigore.</i>
UNI/TS 11337-3	2015	Criteri di codificazione di opere e prodotti da costruzione, attività e risorse. Parte 3: Modelli di raccolta, organizzazione e archiviazione dell'informazione tecnica per i prodotti da costruzione	Definisce modelli di raccolta, organizzazione e archiviazione dell'informazione tecnica dei prodotti da costruzione: definizione delle caratteristiche, degli attributi caratterizzanti e suddivisione tra LOG e LOI. <i>In vigore.</i>
UNI 11337-4	2017	Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni. Parte 4: Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti	Indica i livelli di sviluppo informativo (evoluzione del modello, elaborati, oggetti) e la loro progressione nel tempo. Introduce il concetto dei LOD. <i>In vigore.</i>
UNI 11337-5	2017	Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni. Parte 5: Flussi informativi nei processi digitalizzati.	Definisce i ruoli, le regole e i flussi necessari alla produzione, gestione e trasmissione delle informazioni e la loro connessione e interazione nei processi di costruzione digitalizzati. <i>In vigore.</i>
UNI/TR 11337-6	2017	Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni. Parte 6: Linea guida per la redazione del capitolato informativo.	Fornisce una linea guida per la stesura del capitolato informativo come presentato nella UNI 11337-5. Esso fornisce indicazioni procedurali e uno schema generale dei contenuti del capitolato informativo. <i>In vigore.</i>
UNI 11337-7	2018	Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni. Parte 7: Requisiti di conoscenza, abilità e competenza delle figure coinvolte nella gestione e nella modellazione informativa.	Definisce i requisiti professionali e formativi delle figure BIM (BIM Manager, BIM Coordinator, ecc.). <i>In vigore.</i>
UNI 11337-8	-	-	Tratta i processi d'integrazione tra attività e figure informative e attività e figure tradizionali del settore delle costruzioni (PM / BIM manager). Andrà a sostituire la UNI/PdR 74. <i>Pubblicazione prevista entro fine 2025.</i>
UNI 11337-9	-	-	Tratta la gestione informativa in fase di esercizio: la "Due Diligence", il rilievo digitale (nuvole di punti, termografie, tomografie, ecc.), le regole di costruzione delle "Piattaforme di Collaborazione" aziendali (al di sopra delle librerie di oggetti e degli ambienti di

			condivisione di commessa ACDat/CDE) e, soprattutto, il "Fascicolo del Costruito" digitale. <i>In corso di sviluppo.</i>
UNI 11337-10	-	-	Sviluppa le linee guida per la gestione informativa digitale degli aspetti amministrativi. L'obiettivo è approfondire l'applicazione della metodologia BIM e dei processi di E-Permit alle commesse pubbliche e private ed al processo autorizzativo delle stesse. <i>In corso di sviluppo.</i>
UNI 11337-11	-	-	Blockchain e sicurezza dei dati. <i>In corso di sviluppo.</i>
UNI 11337-12	2025	Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni. Parte 12: Flussi informativi, ruoli e requisiti per le opere infrastrutturali.	Contestualizza i requisiti di progettazione, realizzazione, gestione e manutenzione nelle diverse fasi del processo digitale, individuando approfondimenti comuni alle diverse tipologie di opere infrastrutturali. La norma contiene anche un approfondimento sul tema dell'interoperabilità e dell'integrazione dei dati GIS con la modellazione informativa. <i>In vigore.</i>

Tab. 2.2: UNI 11337

Al fine di avere un quadro completo delle normative e dei decreti che costituiscono gli standard utilizzati nel BIM, oltre alle due serie di norme sopracitate, vengono di seguito riportate in Tab. 2.3 ulteriori norme tecniche rilevanti:

Codice	Anno	Titolo	Note
UNI EN ISO 16739-1	2024	Industry Foundation Classes (IFC) per la condivisione dei dati nell'industria delle costruzioni e del facility management. Parte 1: Schema di dati.	Definisce il formato IFC per lo scambio dati openBIM. Il documento include definizioni che coprono le informazioni necessarie per gli edifici e le opere infrastrutturali durante il loro ciclo di vita. <i>In vigore.</i>
UNI EN ISO 7817-1	2024	Building Information Modelling - Livello di fabbisogno informativo. Parte 1: Concetti e principi.	Approfondisce il concetto livello di fabbisogno informativo (LOIN). Ottimizza la qualità della richiesta informativa. <i>In vigore.</i>
UNI EN 17632-1	2023	Building information modelling (BIM) - Modellazione e collegamento semantico (SML) Parte 1: Schemi di modellazione generica.	Propone un'applicazione delle cosiddette tecnologie Linked Data e Web Semantico a un ambiente costruito, al fine di standardizzare dati con una forma e un significato comune. Rivolto in particolare alle software house ed utilizzabile in tutte le fasi del ciclo di vita dell'edificio. <i>In vigore.</i>
UNI EN 17632-2	2025	Parte 2: Modelli di modellazione specifici per il dominio.	Fornisce modelli estesi e linee guida per la modellazione semantica specifica di dominio, includendo aspetti quali: <ul style="list-style-type: none"> - distinzione tra regioni spaziali e oggetti reali ("tangibili"); - materializzazione degli oggetti (cemento, acciaio, legno, asfalto); - interazione tra oggetti e definizione di requisiti non strutturati (es. esigenze del committente, normative); - modellazione mediante gruppi impliciti (es. "tutte le travi principali di un ponte in acciaio"); - uso di ontologie e standard spaziali / geospaziali.

			<i>In vigore.</i>
UNI EN 17549-2	2023	Building information modelling - Struttura informativa basata sulla EN ISO 16739-1 per lo scambio di modelli di dati e schede tecniche per oggetti di costruzione. Parte 2: Oggetti di costruzione configurabili e requisiti.	Propone una semplificazione della EN ISO 16739-1 con lo scopo di esprimere e mobilitare i requisiti per oggetti edilizi configurabili. Orientato alle software house e applicabile a tutti i cicli vita degli edifici. <i>In vigore.</i>
UNI EN ISO 22057	2022	Sostenibilità negli edifici e nelle opere di ingegneria civile - Modelli di dati per l'uso delle dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD) per i prodotti da costruzione nel Building Information Modelling (BIM).	Fornisce principi per l'utilizzo dei dati ambientali e tecnici forniti nelle EPD in modo da facilitare l'utilizzo dei dati e la valutazione delle prestazioni ambientali di un'opera di costruzione durante il suo ciclo di vita. <i>In vigore.</i>
UNI EN ISO 23386	2020	Building information modelling e altri processi digitali utilizzati nelle costruzioni - Metodologia per descrivere, creare e mantenere proprietà nei dizionari di dati interconnessi.	Definisce uno standard per la strutturazione dei dati digitali nel settore delle costruzioni al fine di garantire l'interoperabilità del dato stesso. Stabilisce le regole per la definizione delle proprietà utilizzate nella costruzione e una metodologia per la loro creazione e manutenzione, tramite: - L'identificazione di attributi comuni; - L'identificazione di regole di costruzione degli attributi. Lo standard individua un processo utile e comune per strutturare la creazione degli attributi di tutti gli oggetti. Ciò funge da base per l'avvio di un processo interoperabile. <i>In vigore.</i>
UNI EN ISO 23387	2020	Building information modelling (BIM) - Modelli di dati per oggetti da costruzione utilizzati nel ciclo di vita dei beni edilizi - Concetti e principi.	Definisce una struttura di dati standardizzata (modello di dati) per applicazioni BIM e i principi che la governano. La standardizzazione del dato è fondamentale per stabilire uno scambio affidabile di informazioni. Ad oggi, gli strumenti per l'interoperabilità sono: - IFC; - Sistemi di classificazione. La 23387 contiene le regole utili al collegamento tra i modelli di dati e gli strumenti di trasmissione (IFC / Sistemi di classificazione). <i>In vigore.</i>
UNI EN ISO 12006-2	2020	Organizzazione dell'informazione delle costruzioni. Parte 2: Struttura per la classificazione.	Definisce una struttura per lo sviluppo di un sistema di classificazione edilizio (IFD). <i>In vigore.</i>
UNI EN ISO 12006-3	2022	Organizzazione dell'informazione delle costruzioni. Parte 3: Struttura per le informazioni orientate agli oggetti.	Specifica un modello informativo indipendente dalla lingua che può essere utilizzato per lo sviluppo di dizionari utilizzati per memorizzare o fornire informazioni sulle opere di costruzione. <i>In vigore.</i>
UNI EN ISO 21597-1	2020	Contenitore di informazioni per la consegna di documenti collegati - Specifiche di scambio. Parte 1: Contenitore.	Definisce un formato di contenitore aperto e stabile per lo scambio dei file di natura eterogenea al fine di consegna, gestione e archivio dei documenti che descrivono un asset per tutto il suo ciclo di vita. <i>In vigore.</i>
UNI EN ISO 21597-2	2021	Contenitore di informazioni per la consegna di documenti collegati - Specifiche di scambio. Parte 2: Tipi di collegamento.	Fornisce l'opportunità di aggiungere informazioni relative ai contenuti di un contenitore attraverso la specializzazione dei

			<p>generici tipi di collegamento specificati nella ISO 21597-1.</p> <p><i>In vigore.</i></p>
UNI EN ISO 16757-1	2019	Strutture dati per i cataloghi elettronici di prodotto per i servizi in edilizia. Parte 1: Concetti, architetture e modelli	<p>Fornisce strutture dati per cataloghi di prodotti elettronici per trasmettere automaticamente i dati di prodotto per i servizi di costruzione, in modo da scambiare informazioni sui prodotti in modo coerente.</p> <p><i>In vigore.</i></p>
UNI EN ISO 16757-2	2019	Parte 2: Geometria	<p>Descrive la modellazione della geometria del prodotto per i servizi di costruzione, in modo da scambiare le informazioni sui prodotti in modo coerente.</p> <p><i>In vigore.</i></p>
UNI EN ISO 29481-1	2017	Modelli di informazioni di edifici - Guida per lo scambio di informazioni. Parte 1: Metodologia e formato.	<p>Specifica:</p> <ul style="list-style-type: none"> - una metodologia che collega le procedure aziendali intraprese durante la costruzione di opere edili con le specifiche informazioni richieste da questi processi; - un modo per mappare e descrivere i processi informativi in tutto il ciclo di vita delle opere edilizie. <p>Promuove la collaborazione digitale tra gli attori del processo edilizio e fornisce una base per lo scambio di informazioni accurato, affidabile, ripetibile e di alta qualità.</p> <p><i>In vigore.</i></p>
UNI EN ISO 29481-2	2016	Parte 2: Quadro di interazione.	<p>Specifica:</p> <ul style="list-style-type: none"> - una metodologia e un formato per descrivere gli atti di coordinamento tra gli attori in un progetto di costruzione durante tutte le fasi del suo ciclo di vita. - una metodologia che descrive un modo appropriato per mappare le responsabilità e le interazioni. <p>Ha l'obiettivo di facilitare l'interoperabilità tra le applicazioni software impiegate nel processo edilizio, promuove la collaborazione digitale tra gli attori del processo edilizio, e fornisce le basi per uno scambio di informazioni accurato, affidabile, ripetibile e di alta qualità.</p> <p><i>In vigore.</i></p>
UNI EN ISO 29481-3	2022	Parte 3: Schema dei dati.	<p>Rappresenta l'aggiunta tecnica alla metodologia stabilita nella norma ISO 29481-1. Definisce una specifica per depositare, scambiare e leggere le specifiche del manuale di consegna delle informazioni (IDM) in modo normalizzato e leggibile dalla macchina.</p> <p><i>In vigore.</i></p>
D.Lgs. 50/2016	2016	Codice dei contratti pubblici (attuazione direttive UE 2014 / 23, 24, 25).	<p>È il primo Codice a introdurre in Italia (art. 23, comma 13) la possibilità di richiedere l'uso di metodi e strumenti elettronici specifici come il BIM nelle fasi di progettazione e gestione delle opere pubbliche. Ha posto le basi normative per il successivo DM 560/2017</p> <p><i>Abrogato dal D.Lgs. 36/2023</i></p>
Decreto ministeriale D.M. 1 dicembre 2017, n. 560	2017	Modalità e i tempi di progressiva introduzione dei metodi e degli strumenti elettronici di modellazione per l'edilizia e le infrastrutture.	<p>Decreto attuativo del D.Lgs. 50/2016. Definisce il percorso graduale di obbligatorietà del BIM negli appalti pubblici in base all'importo dei lavori. Stabilisce i requisiti minimi delle stazioni</p>

			appaltanti e l'obbligo di utilizzo di formati aperti e interoperabili. <i>Modificato dal d.m. MIMS 2 agosto 2021, n. 312.</i>
Decreto ministeriale D.M. MIMS 2 agosto 2021, n. 312.	2021	Modifiche al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 1° dicembre 2017, n. 560	Modifiche al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 1° dicembre 2017, n. 560 che stabilisce le modalità e i tempi di progressiva introduzione dei metodi e degli strumenti elettronici di modellazione per l'edilizia e le infrastrutture. <i>In vigore.</i>
D.Lgs. 36/2023	2023	Codice dei contratti pubblici	Sostituisce il D.Lgs. 50/2016. L'art. 43 sancisce l'obbligatorietà dell'uso di metodi e strumenti di gestione informativa digitale (BIM) negli appalti pubblici. Promuove l'interoperabilità e l'uso di formati aperti, rendendo strutturale la digitalizzazione dei processi di progettazione e gestione. <i>In vigore.</i>

Tab. 2.3: Normative e decreti inerenti al BIM

2.2.2 Normative e leggi nell'ambito della conservazione del patrimonio artistico-culturale

La conservazione del patrimonio artistico-culturale rappresenta un settore regolato da un insieme complesso e multidisciplinare di normative, che spaziano dalla tutela dei beni materiali e architettonici fino alla gestione dei dati e delle tecnologie di documentazione e archiviazione degli stessi.

Di seguito, in Tab. 2.4, vengono riportate alcune delle principali norme e decreti legislativi utili ai fini della presente ricerca, con particolare attenzione ai requisiti ambientali (temperatura, umidità, illuminamento e qualità dell'aria), alle procedure di misura e alle indicazioni per la gestione delle collezioni e degli spazi di conservazione.

Codice	Anno	Titolo	Note
UNI EN 16141	2025	Conservazione del patrimonio culturale - Linee guida per la gestione delle condizioni ambientali. Strutture per la conservazione in depositi delle collezioni: definizioni e caratteristiche degli edifici dedicati alla conservazione e alla gestione del patrimonio culturale.	Definisce le funzioni e le caratteristiche delle strutture di conservazione nei depositi di collezioni. Questi possono essere indipendenti o integrati in istituzioni culturali. Sono finalizzati alla conservazione, al deposito, alla gestione e a permettere l'accessibilità alle collezioni. <i>In vigore.</i>
ISO 21127	2024	Documentazione e informazione. Ontologia di riferimento per l'interscambio di informazioni sui beni culturali.	Stabilisce le linee guida per lo scambio d'informazioni tra istituzioni che gestiscono beni culturali, quali musei, biblioteche e archivi. Lo scopo della presente norma è lo scambio e l'integrazione di documentazione scientifica eterogenea relativa alle collezioni di tali istituzioni. <i>In vigore.</i>
UNI EN 17820	2023	Conservazione del Patrimonio Culturale. Norme per la gestione delle collezioni di opere d'arte mobili.	Specifica i termini e gli standard per la gestione delle collezioni di opere d'arte mobili, sia in formato fisico che digitale. Si intende l'utilizzo da parte di enti proprietari di collezioni come archivi, biblioteche, musei e gallerie. <i>In vigore.</i>
UNI 11897	2023	Conservazione del patrimonio culturale.	Fornisce alcuni strumenti metodologici atti a definire i concetti di qualità e le linee guida

		Linee guida per l'applicazione dei criteri generali di qualità negli interventi di conservazione e restauro dei beni culturali.	relativi alle varie fasi operative previste dal progetto d'intervento. La presente norma è applicabile in tutte le fasi del processo di conservazione dei beni culturali tangibili. <i>In vigore.</i>
ASHRAE Handbook	2019	ASHRAE Handbook 2019 : heating, ventilating, and air-conditioning applications. Chapter 24: Museums, Galleries, Archives, and Libraries.	Approfondisce sostenibilità, tecnologie digitali (IoT e sensori), uso efficiente dell'energia, integrazione tra conservazione e comfort, e procedure operative più dettagliate. <i>Edizione aggiornata.</i>
UNI EN 15898	2019	Conservazione del patrimonio culturale. Termini generali e definizioni	Definisce i termini generali nel settore della conservazione del patrimonio culturale, con particolare riferimento a quelli che hanno un utilizzo o un valore descrittivo per più materiali. <i>In vigore.</i>
UNI EN 16893	2018	Conservazione del patrimonio culturale. Specifiche per la scelta del luogo, la costruzione e le modifiche di edifici o sale finalizzate al deposito o all'esposizione di collezioni del patrimonio culturale.	Fornisce specifiche e costituisce una guida per quanto concerne la scelta del luogo, la costruzione e l'adattamento di edifici finalizzati al deposito o all'esposizione di ogni tipo e formato di collezioni del patrimonio culturale. La presente norma si applica a edifici dove le collezioni sono tenute permanentemente e può essere usata come guida per spazi espositivi temporanei, quando appropriato. <i>In vigore.</i>
UNI EN 16790:2016	2016	Conservazione dei beni culturali - Gestione integrata delle specie nocive per la protezione dei beni culturali.	Definisce la gestione integrata delle specie nocive (IMP) e descrive una metodologia completa per la gestione dei problemi legati agli organismi nocivi finalizzata alla protezione dei beni culturali. Norma di riferimento per il controllo ambientale nei depositi e musei. <i>In vigore.</i>
ISO 18461:2016	2016	International museum statistics.	Specifica le regole per la comunità museale in materia di raccolta e comunicazione dei dati statistici. Fornisce definizioni e procedure di conteggio per tutti i tipi di risorse e servizi che i musei offrono ai propri utenti. <i>In vigore.</i>
UNI EN 16242	2013	Conservazione dei beni culturali - Procedure e strumenti per misurare l'umidità dell'aria e gli scambi di vapore tra l'aria e i beni culturali.	Guida e specifica le procedure e la strumentazione per misurare l'umidità relativa (UR) in aria, sia in ambienti confinati che all'esterno. La norma contiene raccomandazioni per ottenere misure accurate delle condizioni ambientali e degli scambi di vapore tra l'aria e gli oggetti del patrimonio culturale. <i>In vigore.</i>
UNI EN 15759-1	2012	Conservazione dei beni culturali - Clima interno. Parte 1: Linee guida per riscaldamento delle chiese, cappelle e altri luoghi di culto.	Fornisce le linee guida per la scelta delle strategie di riscaldamento e impianti di riscaldamento nelle chiese, cappelle e altri luoghi di culto come le moschee e sinagoghe, al fine di evitare danni ai beni culturali e al tempo stesso creare un clima interno che permette un uso sostenibile di tali edifici. <i>In vigore.</i>
UNI EN 15759-2	2018	Parte 2: Gestione della ventilazione per la protezione degli edifici che appartengono al patrimonio culturale e delle collezioni.	Fornisce delle linee guida per come gestire la ventilazione per la protezione degli edifici che appartengono al patrimonio culturale e delle collezioni in questi contenute. Contemporaneamente, è finalizzata a creare condizioni climatiche interne per un uso

			sostenibile di questi palazzi e delle loro collezioni. <i>In vigore.</i>
ASHRAE Handbook	2011	ASHRAE Handbook 2011 : heating, ventilating, and air-conditioning applications. Chapter 24: Museums, Galleries, Archives, and Libraries.	Fornisce linee guida per il controllo ambientale in ambienti di conservazione (musei, archivi, biblioteche). Definisce intervalli raccomandati di temperatura e umidità per la conservazione di materiali sensibili e sottolinea l'importanza della stabilità dei parametri rispetto ai valori assoluti. Include raccomandazioni per la progettazione HVAC, il monitoraggio ambientale continuo e la gestione dei rischi legati alle variazioni climatiche. <i>Aggiornato da ASHRAE Handbook 2019.</i>
UNI EN 15758	2010	Conservazione dei Beni Culturali - Procedure e strumenti per misurare la temperatura dell'aria e quella della superficie degli oggetti.	Raccomanda le procedure per misurare la temperatura dell'aria e quella della superficie dei beni culturali sia in ambienti interni sia all'aperto; riporta inoltre le caratteristiche minime per la strumentazione necessaria a tali misurazioni. <i>In vigore.</i>
UNI EN ISO 15757	2010	Conservazione dei Beni Culturali. Specifiche concernenti la temperatura e l'umidità relativa per limitare i danni meccanici causati dal clima ai materiali organici igroscopici.	Guida che specifica i livelli di temperatura e umidità relativa per limitare i danni fisici che il clima causa ai materiali organici igroscopici. <i>In vigore.</i>
D.Lgs. 42/2004	2004	Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42. Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137.	Definisce la tutela, le competenze e le modalità di intervento su beni culturali e ambientali. <i>In vigore (aggiornato più volte, da ultimo con D.Lgs. 156/2006 e D.Lgs. 62/2008).</i>
D.M. 10 maggio 2001	2001	Decreto Ministeriale 10 maggio 2001. Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei (Art. 150, comma 6, D.L. n. 112/1998).	Definisce i requisiti minimi e gli standard di qualità che i musei devono rispettare per garantire una corretta tutela, conservazione e valorizzazione del patrimonio culturale. <i>In vigore.</i>
UNI 10829	1999	Beni di interesse storico e artistico - Condizioni ambientali di conservazione. Misurazione ed analisi.	Prescrive una metodologia per la misurazione in campo delle grandezze ambientali termoigrometriche e di illuminazione ai fini della conservazione di beni di interesse storico e artistico e fornisce indicazioni relative alle modalità di elaborazione e sintesi dei dati rilevati per una loro valutazione finalizzata al contenimento dei processi di degrado. Esempio di parametri considerati: - Temperatura e umidità relativa dell'aria; - max escursione giornaliera di temperatura; - max valore di illuminamento; - max quantità di radiazione ultravioletta; - max dose annuale di luce. Esempio di parametri termoigrometrici ottimali: - libri e documenti d'archivio 13-18°C 50-60% - dipinti su tela 19-24°C 40-55% - pellicole fotografiche 0-15°C 30-45% - Mobili, sculture e dipinti su legno 19-24°C 50-60% - mosaici, rocce, pietre 15-25°C 20-60% - metalli, armature, argenti NR <50% <i>In vigore.</i>

Tab. 2.4: Normative conservazione del patrimonio artistico-culturale

2.2.3 Normative e leggi nell'ambito energetico

L'efficienza energetica rappresenta oggi uno dei principali ambiti di intervento nel settore delle costruzioni, in particolare per il patrimonio edilizio esistente e storico, dove le strategie di retrofit devono essere compatibili con i vincoli di tutela e conservazione dei valori culturali. L'evoluzione normativa in questo campo è stata fortemente influenzata dalle politiche europee sul contenimento dei consumi e delle emissioni, come ad esempio la Direttiva EPBD (Energy Performance of Buildings Directive, spesso richiamata nel dibattito pubblico come Direttiva Case Green), finalizzata a migliorare l'efficienza energetica degli edifici, con l'obiettivo di raggiungere un parco edilizio a zero emissioni entro il 2050.

Il quadro regolatorio è articolato e stratificato: accanto all'EPBD, un ruolo centrale è svolto anche dalla Direttiva sull'efficienza energetica (EED) e dai relativi atti di recepimento nazionali, oltre che dalle norme tecniche a supporto (ad es. linee guida specifiche per gli edifici storici). La Tab. 2.5 intende sintetizzare i principali riferimenti europei e italiani utilizzati nella presente ricerca, evidenziando obiettivi, ambito di applicazione e stato di recepimento.

Codice	Anno	Titolo	Note
Direttiva 2024/1275/UE (EPBD IV)	2024	Direttiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 24 aprile 2024 sulla prestazione energetica nell'edilizia. (rifusione).	Definisce nuovi obiettivi per edifici a emissioni zero (ZEB), ristrutturazioni profonde e monitoraggio energetico digitale. <i>In vigore. Recepimento da parte degli stati membri UE entro il 29 maggio 2026.</i>
D.Lgs. 48/2020	2020	Decreto Legislativo 10 giugno 2020, n. 48. Attuazione della direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica. (20G00066) (GU Serie Generale n.146 del 10-06-2020).	Recepimento Direttiva 2018/844/UE. Introduce il concetto di edifici nZEB, smart readiness, automazione e monitoraggio. <i>In vigore.</i>
Direttiva 2018/844/UE (EPBD III)	2018	Direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica.	Promuove l'integrazione dei sistemi intelligenti di controllo e introduce il concetto di <i>Smart Readiness Indicator</i> , SRI, indice che consente di valutare l'intelligenza degli edifici in base alla loro capacità di svolgere tre funzionalità principali: - ottimizzare l'efficienza energetica e le prestazioni complessive in uso; - adattare il loro funzionamento alle esigenze dell'occupante; - adattarsi ai segnali provenienti dalla rete (ad esempio flessibilità energetica). <i>In vigore.</i>
UNI EN 16883	2017	Conservazione dei beni culturali - Linee guida per migliorare la prestazione energetica degli edifici storici.	Linee guida per la riqualificazione energetica di edifici storici, attraverso un approccio multidisciplinare e basato sull'analisi del valore patrimoniale. Propone una matrice di compatibilità tra interventi e vincoli di conservazione. <i>In vigore.</i>
UNI 10349-1	2016	Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici. Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termoeconomica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradiazione solare nella	Riporta i dati climatici rappresentativi delle condizioni climatiche medie da utilizzare per la verifica delle prestazioni energetiche e termoeconomiche dell'edificio. <i>In vigore.</i>

		frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata.	
UNI/TR 10349-2	2016	Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici. Parte 2: Dati di progetto.	Rapporto tecnico che riporta i dati rappresentativi delle condizioni climatiche limite raccomandati per il dimensionamento degli impianti tecnici per la climatizzazione estiva ed invernale e per valutare il rischio di surriscaldamento. <i>In vigore.</i>
UNI 10349-3:2016	2016	Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici. Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici.	Riguarda i metodi di calcolo e i prospetti di sintesi relativi agli indici sintetici da utilizzare per la descrizione climatica del territorio. La norma integra la UNI EN ISO 15927-6 e fornisce una metodologia di calcolo completa da utilizzare per la determinazione, sia nella stagione di raffrescamento che di riscaldamento degli edifici: - dei gradi giorno; - delle differenze cumulate di umidità; - della radiazione solare cumulata su piano orizzontale; - dell'indice sintetico di severità climatico del territorio. <i>In vigore.</i>
UNI/TS 11300-1	2014	Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 1: determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.	Specifica tecnica che definisce le modalità per l'applicazione nazionale della UNI EN ISO 13790:2008 con riferimento al metodo mensile per il calcolo dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e per raffrescamento. <i>In vigore.</i>
UNI/TS 11300-2	2019	Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali.	Specifica tecnica che fornisce dati e metodi di calcolo per la determinazione dei fabbisogni di energia termica utile per il servizio di produzione di acqua calda sanitaria, nonché di energia fornita e di energia primaria per i servizi di climatizzazione invernale e acqua calda sanitaria. Essa fornisce inoltre il metodo di calcolo per la determinazione del fabbisogno di energia primaria per il servizio di ventilazione e le indicazioni e i dati nazionali per la determinazione dei fabbisogni di energia primaria per il servizio di illuminazione in accordo con la UNI EN 15193. <i>In vigore.</i>
UNI/TS 11300-3	2010	Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva.	Specifica tecnica che fornisce dati e metodi per la determinazione: - dei rendimenti e dei fabbisogni di energia dei sistemi di climatizzazione estiva; - dei fabbisogni di energia primaria per la climatizzazione estiva. <i>In vigore.</i>
UNI/TS 11300-4	2016	Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria	Specifica tecnica che calcola il fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale e la produzione di acqua calda sanitaria nel caso vi siano sottosistemi di generazione che forniscono energia termica utile da energie rinnovabili o con metodi di generazione diversi dalla combustione a fiamma di combustibili fossili trattata nella UNI/TS 11300-2. <i>In vigore.</i>

UNI/TS 11300-5	2016	Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 5: Calcolo dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili	Specifica tecnica che fornisce metodi di calcolo per determinare in modo univoco e riproducibile applicando la normativa tecnica citata nei riferimenti normativi: - il fabbisogno di energia primaria degli edifici sulla base dell'energia consegnata ed esportata; - la quota di energia da fonti rinnovabili. <i>In vigore.</i>
Direttiva 2012/27/UE (EED)	2012	Direttiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2012 sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE.	Nota anche come <i>Direttiva sull'efficienza energetica</i> (EED - Energy Efficiency Directive), definisce misure comuni per promuovere l'efficienza energetica generale: audit, contatori intelligenti, obblighi PA. <i>In vigore. Aggiornata/rifusa dalla Direttiva (UE) 2023/1791, con recepimento previsto entro ottobre 2025.</i>
Direttiva 2010/31/UE (EPBD II)	2010	Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia. (rifusione)	Sostituisce la Direttiva 2002/91/CE, introducendo il concetto di edifici nZEB, near Zero Energy Building, edifici a energia quasi zero. <i>In vigore. Modificata da Direttiva 2018/844/UE.</i>
D.Lgs. 311/2006	2006	Decreto legislativo 29 dicembre 2006, n. 311. Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo n. 192 del 2005, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia.	Rafforzamento del 192/2005: aggiornamento requisiti minimi, verifica obbligatoria per ampliamenti >20%. <i>In vigore.</i>
D.Lgs. 192/2005	2005	Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192. Attuazione della direttiva (UE) 2018/844, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, della direttiva 2010/31/UE, sulla prestazione energetica nell'edilizia, e della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.	Recepimento della prima direttiva EPBD (2002/91/CE) nell'ordinamento italiano. Stabilisce i requisiti minimi, la certificazione energetica (APE) e le modalità di verifica. <i>In vigore con successive modifiche e integrazioni da decreti attuativi e correttivi.</i>
Direttiva 2002/91/CE (EPBD I)	2002	Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia.	Prima direttiva EPBD sul rendimento energetico nell'edilizia. Ha introdotto il concetto di certificazione energetica degli edifici (APE). <i>Abrogata dal recast 2010.</i>
D. P. R. n. 412 del 26 agosto 1993	1993	Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412. Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10	Definisce le zone climatiche e limiti di esercizio per impianti termici. <i>In vigore.</i>
Legge 9 gennaio 1991, n. 10 (c.d. Legge 10)	1991	Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia.	Prima legge italiana organica sull'uso razionale dell'energia negli edifici. <i>Abrogata, anche se resta nella pratica progettuale il concetto di relazione tecnica ex Legge 10.</i>

Tab. 2.5: Normative in ambito energetico

2.2.4 Requisiti Minimi degli edifici

I Requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici sono stabiliti dal Decreto Ministeriale 26 giugno 2015 [171], che recepisce a livello nazionale le direttive europee in materia di prestazione energetica degli edifici, con particolare riferimento alla Direttiva 2010/31/UE (EPBD, Energy Performance of Buildings Directive).

Il decreto definisce i metodi di calcolo della prestazione energetica degli edifici, compreso l'impiego delle fonti rinnovabili, nonché le prescrizioni e i requisiti minimi applicabili agli edifici e alle unità immobiliari, sia pubblici sia privati.

Il decreto definisce varie tipologie di interventi:

- Nuova costruzione;
- Ampliamento, nel caso che il nuovo volume riscaldato sia superiore al 15% del volume esistente o comunque superiore a 500 m³;
- Ristrutturazione importante, ovvero quegli interventi che interessano gli elementi e i componenti integrati costituenti l'involucro edilizio (elementi opachi e trasparenti) che delimitano un volume a temperatura controllata dall'ambiente esterno o verso ambienti non riscaldati, con un'incidenza superiore al 25% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio. Si distinguono in ristrutturazioni importanti di primo e secondo livello. Possono essere considerate di primo livello se l'intervento coinvolge l'involucro per oltre il 50% della superficie lorda complessiva dell'edificio e include la ristrutturazione dell'impianto termico asservito all'intero edificio. Sono invece di secondo livello se l'intervento interessa l'involucro per oltre il 25% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio con la possibilità di coinvolgere l'impianto termico limitatamente alle sole porzioni interessate dai lavori;
- Riquilificazione energetica, ovvero gli interventi non riconducibili ai casi precedenti, e che coinvolgono una superficie $\leq 25\%$ della superficie disperdente lorda dell'edificio e/o prevedano la nuova installazione o ristrutturazione dell'impianto termico, compresa la sostituzione del generatore.

Risultano esclusi dall'applicazione dei requisiti minimi gli interventi di ripristino dell'involucro edilizio (ad esempio le tinteggiature delle facciate) e la manutenzione ordinaria sugli impianti termici.

Una volta determinata la tipologia di intervento, il decreto identifica i requisiti da rispettare mediante l'utilizzo del cosiddetto edificio di riferimento. Con edificio di riferimento, o target, si intende un edificio identico in termini di geometria (sagoma, volumi, superficie calpestabile, superfici degli elementi costruttivi e dei componenti), orientamento, ubicazione territoriale, destinazione d'uso e situazione al contorno e avente caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati.

Nel caso, ad esempio, di un intervento di nuova realizzazione, i requisiti minimi dell'involucro edilizio per quanto riguarda una parete opaca verticale a separazione di un ambiente riscaldato con l'esterno, dovranno rispettare i limiti di trasmittanza U (W/m²K) schematizzati in Fig. 2.5 (per la consultazione completa dello schema si rimanda alla pagina web GitHub relativa all'approfondimento delle normative di riferimento per la presente ricerca [172]). Come si può osservare dall'immagine, i valori limite cambiano in base alle zone climatiche, concetto introdotto dal D.P.R. 412/1993 ed ancora di riferimento per normative e calcoli

energetici. Il decreto suddivide il territorio italiano in sei zone climatiche, nominate dalla A alla F (dalla più calda alla più fredda) in base alla temperatura media esterna giornaliera. Il criterio utilizzato per tale suddivisione è la misurazione dei gradi giorno (GG), e non l'ubicazione geografica. I gradi giorno rappresentano la somma, estesa a tutti i giorni dell'anno convenzionale di riscaldamento, della differenza tra la temperatura interna convenzionale (20 °C) e la temperatura media esterna giornaliera, solo quando quest'ultima è inferiore a 20 °C:

$$GG = \sum (20 - T_{ext,med})$$

Una sommatoria di gradi giorno inferiore a 600 comporta la classificazione del Comune nel quale si trova l'edificio nella zona climatica A, quella con il clima più mite e quindi meno restrittiva dal punto di vista delle trasmittanze minime richieste. Al contrario, una zona climatica con molti gradi giorno, oltre i 3000 GG, comporterà il rispetto dei limiti previsti per la zona F, quella più fredda e quindi con trasmittanze limite più vincolanti.

Lo stesso concetto visto nell'esempio precedente inerente l'involucro edilizio si applica anche per le altre componenti degli edifici riguardanti, ad esempio, le caratteristiche prestazionali degli impianti e le prestazioni energetiche totali ($EP_{gl,tot}$). Ciò consente di avere un quadro organico dei requisiti prestazionali che l'edificio è tenuto a rispettare ai fini della conformità normativa e dell'efficienza energetica.

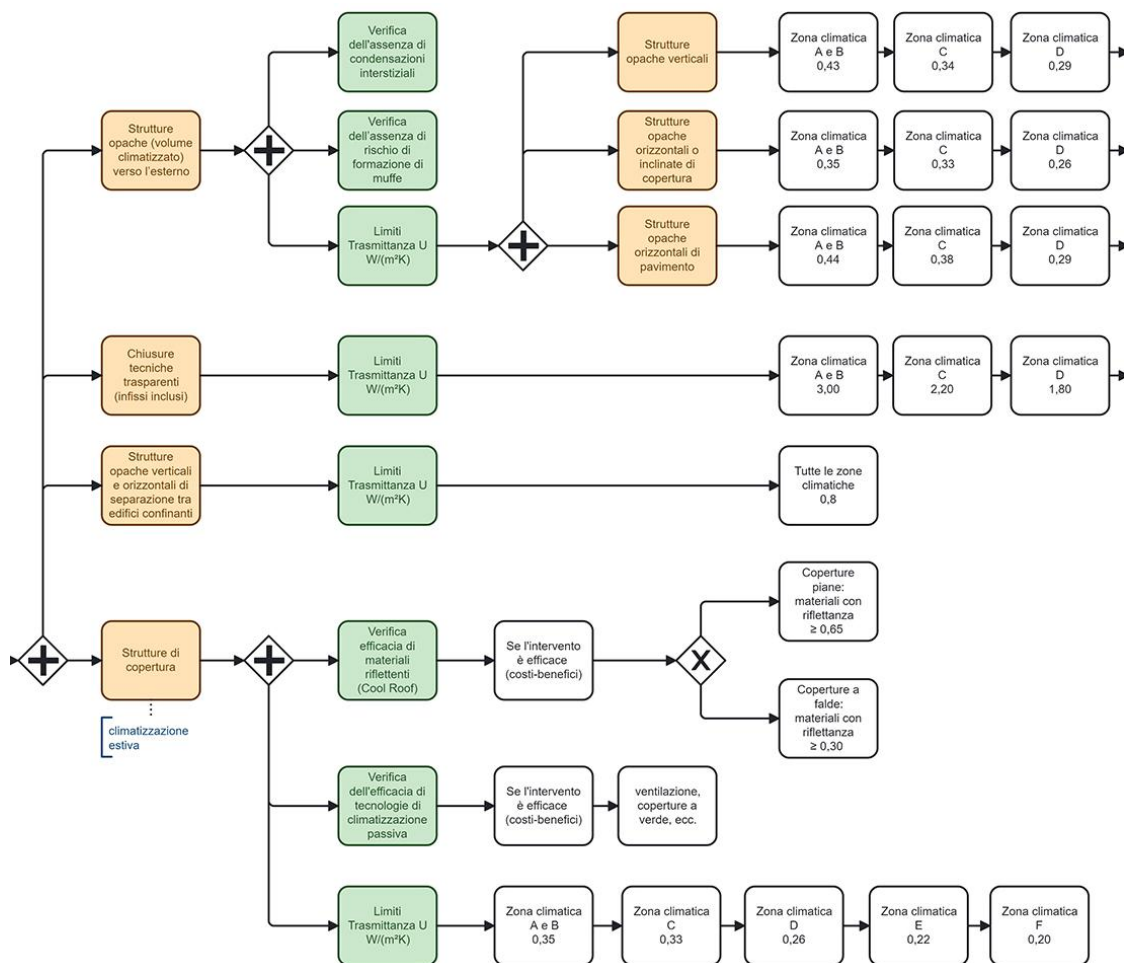


Fig. 2.5: Requisiti minimi degli edifici – involucro

Nella seduta del 30 luglio 2025 la Conferenza Unificata (organo che mira a favorire la cooperazione e il raccordo tra le Amministrazioni Centrali e il sistema delle autonomie locali su materie di comune interesse) ha raggiunto l'intesa sul decreto che aggiornerà il D.M. 26/06/2015, in particolare le principali novità riguarderanno [173]:

- L'aggiornamento delle norme tecniche di riferimento per il calcolo della prestazione energetica, con l'introduzione di UNI/TS 11300-5, UNI/TS 11300-6 e UNI EN 15193 per illuminazione;
- L'introduzione esplicita dei ponti termici nell'edificio di riferimento (allo scopo di caratterizzare meglio le verifiche, sia sui nuovi edifici, ma soprattutto sugli edifici esistenti);
- Le modifiche alle verifiche di trasmittanza;
- La revisione delle verifiche sul parametro $H't$ (coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione);
- L'introduzione del metodo Carnot per il calcolo dei coefficienti di conversione in energia primaria in caso di presenza di sistemi cogenerativi (teleriscaldamento);
- L'aggiornamento nei requisiti minimi di prescrizioni su benessere ambientale e sicurezza in linea con le nuove norme europee;
- L'obbligo di sistemi di automazione e controllo di classe B in edifici non residenziali anche in caso di ristrutturazioni di secondo livello e riqualificazioni;
- L'introduzione di requisiti e prescrizioni per l'integrazione delle tecnologie per la ricarica dei veicoli elettrici per i soli edifici dotati di posti auto.

I Requisiti Minimi degli edifici rappresentano oggi uno strumento centrale per la valutazione delle prestazioni termiche del costruito, definendo soglie prestazionali misurabili e criteri di verifica standardizzati. In questo contesto, l'utilizzo di modelli informativi BIM consente di strutturare in modo coerente e verificabile le informazioni richieste dalla normativa, associando ai singoli elementi dell'edificio i parametri necessari per il calcolo delle prestazioni termiche e per il confronto con l'edificio di riferimento.

L'integrazione tra dati geometrici, stratigrafici e prestazionali permette di superare una gestione frammentata delle verifiche, favorendo un approccio più sistematico e trasparente alla conformità normativa.

2.2.5 Criteri Ambientali Minimi - CAM

I Criteri Ambientali Minimi (CAM) sono stati introdotti nell'ordinamento italiano con il Decreto Ministeriale 24 dicembre 2015 (successivamente aggiornato, da ultimo con il D.M. 23 giugno 2022 [174]), in attuazione del Codice dei Contratti Pubblici (D.Lgs. 50/2016, art. 34, oggi confluito nel D.Lgs. 36/2023).

Essi costituiscono lo strumento normativo principale attraverso cui viene applicato il concetto di Green Public Procurement (GPP), ovvero l'integrazione di requisiti ambientali all'interno delle procedure di appalto pubblico.

Per GPP si intende l'insieme dei processi attuati dagli enti pubblici per acquistare beni, servizi e opere con un ridotto impatto ambientale lungo tutto il loro ciclo di vita. Queste disposizioni si applicano a tutti gli interventi edilizi di lavori disciplinati dal Codice dei Contratti pubblici, quali: costruzione, demolizione, recupero, ristrutturazione urbanistica ed edilizia,

sostituzione, restauro, manutenzione di opere, manutenzione ordinaria e manutenzione straordinaria.

Una delle novità introdotte dal decreto riguarda l'obbligatorietà, da parte dei progettisti, della redazione della cosiddetta relazione CAM. Al suo interno devono essere indicati, per ogni criterio, le scelte progettuali inerenti le modalità di applicazione e integrazione di materiali, componenti e tecnologie adottate, l'elenco degli elaborati grafici, schemi, tabelle di calcolo ed eventuali ulteriori allegati, nei quali siano evidenziati lo stato ante operam, gli interventi previsti, i risultati conseguibili e lo stato post operam, dimostrando il rispetto dei criteri contenuti nel decreto.

Inoltre, il progettista deve dare evidenza dei motivi di carattere tecnico che hanno portato all'eventuale applicazione parziale o mancata applicazione delle specifiche tecniche.

Il decreto distingue quattro macroaree specifiche [175], ognuna delle quali ha i propri criteri, nel dettaglio troviamo:

- 2.3 Specifiche tecniche progettuali di livello territoriale-urbanistico. Si applicano ai progetti che includono modificazioni dello stato dei luoghi:
 - 2.3.1 Inserimento naturalistico e paesaggistico. Deve essere garantita la conservazione degli habitat presenti nell'area di intervento;
 - 2.3.2 Permeabilità della superficie territoriale. Non inferiore al 60% in caso di nuovi interventi;
 - 2.3.3 Riduzione dell'effetto "isola di calore estiva" e dell'inquinamento atmosferico;
 - 2.3.4 Riduzione dell'impatto sul sistema idrografico superficiale e sotterraneo;
 - 2.3.5 Infrastrutturazione primaria. Raccolta, depurazione e riuso delle acque meteoriche, aree attrezzate per la raccolta differenziata dei rifiuti, impianto di illuminazione pubblica, sottoservizi per infrastrutture tecnologiche;
 - 2.3.6 Infrastrutturazione secondaria e mobilità sostenibile;
 - 2.3.7 Approvvigionamento energetico. Fabbisogno degli edifici soddisfatto, per quanto possibile, da impianti alimentati da fonti rinnovabili (eolico, biomasse, ecc.) favorendo in particolare la partecipazione a comunità energetiche rinnovabili;
 - 2.3.8 Rapporto sullo stato dell'ambiente (chimico, fisico-biologico, vegetazionale, ecc.);
 - 2.3.9 Risparmio idrico.
- 2.4 Specifiche tecniche progettuali per gli edifici:
 - 2.4.1 Diagnosi energetica. La stazione appaltante fornisce al progettista tutti i dati necessari alla redazione della diagnosi energetica;
 - 2.4.2 Prestazione energetica. Gli interventi devono garantire adeguati livelli di comfort termico degli ambienti interni;
 - 2.4.3 Impianti di illuminazione per interni, conformi alla norma UNI EN 12464-1;
 - 2.4.4 Ispezionabilità e manutenzione degli impianti di riscaldamento e condizionamento;
 - 2.4.5 Aerazione, ventilazione e qualità dell'aria. Deve essere garantita l'adeguata qualità dell'aria interna in tutti i locali abitabili e adottate le strategie di ventilazione consone al tipo di intervento in oggetto;

- 2.4.6 Benessere termico. Deve essere garantito il benessere termico e la qualità dell'aria interna prevedendo condizioni conformi almeno alla classe B secondo la norma UNI EN ISO 7730 in termini di PMV (Voto Medio Previsto) e di PPD (Percentuale Prevista di Insoddisfatti);
- 2.4.7 Illuminazione naturale. Va garantita una dotazione e una distribuzione minima dell'illuminazione naturale all'interno dei locali regolarmente occupati;
- 2.4.8 Dispositivi di ombreggiamento. Va garantito il controllo dell'immissione di radiazione solare diretta nell'ambiente interno;
- 2.4.9 Tenuta all'aria dell'involucro;
- 2.4.10 Inquinamento elettromagnetico negli ambienti interni. Deve essere prevista una ridotta esposizione a campi magnetici a bassa frequenza (ELF) e alta frequenza (RF);
- 2.4.11 Prestazioni e comfort acustici adeguati;
- 2.4.12 Radon. Vanno previste strategie e tecniche idonee alla riduzione della concentrazione di Radon all'interno degli edifici;
- 2.4.13 Piano di manutenzione dell'opera comprensivo della verifica dei livelli prestazionali (qualitativi e quantitativi) in riferimento alle prestazioni ambientali (es. verifica delle prestazioni dell'impermeabilizzazione);
- 2.4.15 Disassemblaggio e fine vita. Almeno il 70% peso/peso dei componenti edilizi e degli elementi prefabbricati utilizzati nel progetto, esclusi gli impianti, sia sottoponibile, a fine vita, a disassemblaggio o demolizione selettiva (decostruzione) per essere poi sottoposto a preparazione per il riutilizzo, riciclaggio o altre operazioni di recupero.

A seconda del tipo di intervento edilizio, come si può osservare in Fig. 2.6 corrisponde il relativo criterio CAM da soddisfare.




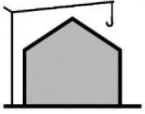

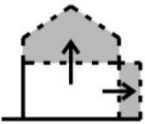
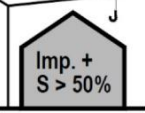


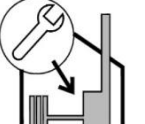
		Specifiche tecniche a livello territoriale e urbanistico	Specifiche tecniche progettuali per l'edificio
Gruppi di nuovi edifici		2.3.7, 2.3.8	
Nuovi edifici		2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4, 2.3.5, 2.3.6, 2.3.7, 2.3.9	2.4.2, 2.4.3, 2.4.4, 2.4.5, 2.4.6, 2.4.7, 2.4.8, 2.4.9, 2.4.10, 2.4.11, 2.4.12, 2.4.13, 2.4.14
Ristrutturazione urbanistica		2.3.3, 2.3.4, 2.3.5, 2.3.6, 2.3.7, 2.3.8	2.4.7, 2.4.8
Ristrutturazione edilizia			2.4.7, 2.4.11, 2.4.14
Demolizioni e ricostruzioni			2.4.2, 2.4.3, 2.4.4, 2.4.5, 2.4.6, 2.4.7, 2.4.8, 2.4.9, 2.4.10, 2.4.11, 2.4.12, 2.4.13, 2.4.14
Ampliamenti volumetrici			2.4.5
Ristrutturazioni Importanti di 1° livello			2.4.1, 2.4.2, 2.4.5
Ristrutturazioni Importanti di 2° livello			2.4.1, 2.4.2, 2.4.5
Riqualificazione energetica			2.4.1, 2.4.2, 2.4.5
Ristrutturazione impianti			2.4.3

Fig. 2.6: CAM Specifiche tecniche (fonte: Guida CAM ANIT 2023)

Ad esempio, nel caso di una ristrutturazione importante di primo livello (come definita dal decreto sui requisiti minimi degli edifici), le specifiche da rispettare riguardano i punti 2.4.1, 2.4.2 e 2.4.5, come schematizzato in Fig. 2.7 (per la consultazione completa dello schema si rimanda alla pagina web GitHub della presente ricerca incentrata sulle normative [172]).



Fig. 2.7: CAM Ristrutturazione 1° livello

La specifica successiva, 2.5, riguarda le caratteristiche ambientali che devono avere i prodotti da costruzione. In particolare viene indicata la quantità di materiali riciclati che devono avere materiali come calcestruzzo, acciaio, laterizi, isolanti termici e acustici, pavimentazioni e murature.

La specifica 2.6 è invece dedicata agli aspetti legati al cantiere:

- 2.6.1 Prestazione ambientale del cantiere;
- 2.6.2 Demolizione selettiva, recupero e riciclo;
- 2.6.3 Conservazione dello strato superficiale del terreno;
- 2.6.4 Rinterri e riempimenti.

Nei casi di bandi di progettazione in cui si richiede il BIM (per quanto riguarda l'Italia si tratta del Decreto Ministeriale 560/2017, noto come Decreto BIM), è attribuito da parte della stazione appaltante un punteggio premiante all'operatore economico che si impegna a implementare la base dati del BIM con le informazioni ambientali relative alle specifiche tecniche di cui ai capitoli "2.4-Specifiche tecniche progettuali per gli edifici", "2.5-Specifiche tecniche per i prodotti da costruzione" e "2.6-Specifiche tecniche progettuali relative al cantiere".

Alla luce di quanto esposto, emerge come i Criteri Ambientali Minimi non rappresentino esclusivamente un insieme di prescrizioni normative da soddisfare in fase progettuale, ma costituiscano un quadro di riferimento strutturato che può essere efficacemente integrato all'interno dei modelli informativi BIM.

In particolare, l'elevato numero di requisiti prestazionali, ambientali e manutentivi previsti dai CAM rende evidente la necessità di strumenti in grado di supportarne la gestione, la verifica e l'aggiornamento nel tempo, superando un approccio basato esclusivamente su elaborati statici e relazioni descrittive.

In questo senso, l'utilizzo del BIM consente di associare ai singoli elementi del modello le informazioni richieste dai CAM, rendendo possibile una verifica più trasparente e tracciabile del rispetto dei criteri ambientali lungo l'intero ciclo di vita dell'opera. Tale aspetto risulta particolarmente rilevante negli interventi di ristrutturazione e riqualificazione del patrimonio esistente, e ancor più in ambito di edifici storici vincolati, dove la necessità di documentare le scelte progettuali, motivare eventuali deroghe e monitorare le prestazioni nel tempo assume un ruolo centrale nel dialogo con le stazioni appaltanti e gli enti preposti alla tutela.

2.3 Casi studio

Al fine di dimostrare la scalabilità e la duttilità delle procedure proposte, sono stati utilizzati nella presente ricerca tre casi studio (C.S.) tra loro significativamente differenti in termini di dimensioni, epoca costruttiva, destinazione d'uso e vincoli normativi e conservativi ai quali risultano sottoposti.

L'obiettivo è verificare la replicabilità del flusso di lavoro e la sua adattabilità a diversi scenari.

2.3.1 C.S. 1: Edificio residenziale convenzionale

Il primo caso studio riguarda un edificio residenziale convenzionale, ed è stato selezionato in quanto rappresenta una situazione tipica dell'edilizia residenziale italiana contemporanea non vincolata. Si tratta di un edificio costruito negli anni Sessanta (Fig. 2.8), composto da appartamenti indipendenti distribuiti su due piani e attualmente oggetto di interventi di riqualificazione energetica.

È stato quindi possibile testare l'approccio proposto in un contesto privo di vincoli storici o architettonici, con maggiori possibilità di rilievo e acquisizione dei dati. La collocazione dell'edificio in un clima rigido con oltre 3000 gradi giorno, che lo colloca in zona climatica F, ne accentua la criticità energetica, rendendo necessarie strategie di riqualificazione mirate sia a ridurre i consumi sia a migliorare le condizioni di comfort interno. Questo caso studio è utile come caso "base", propedeutico a quelli successivi, più complessi in termini di gestione di grandi quantità di dati e vincoli sul patrimonio storico costruito.

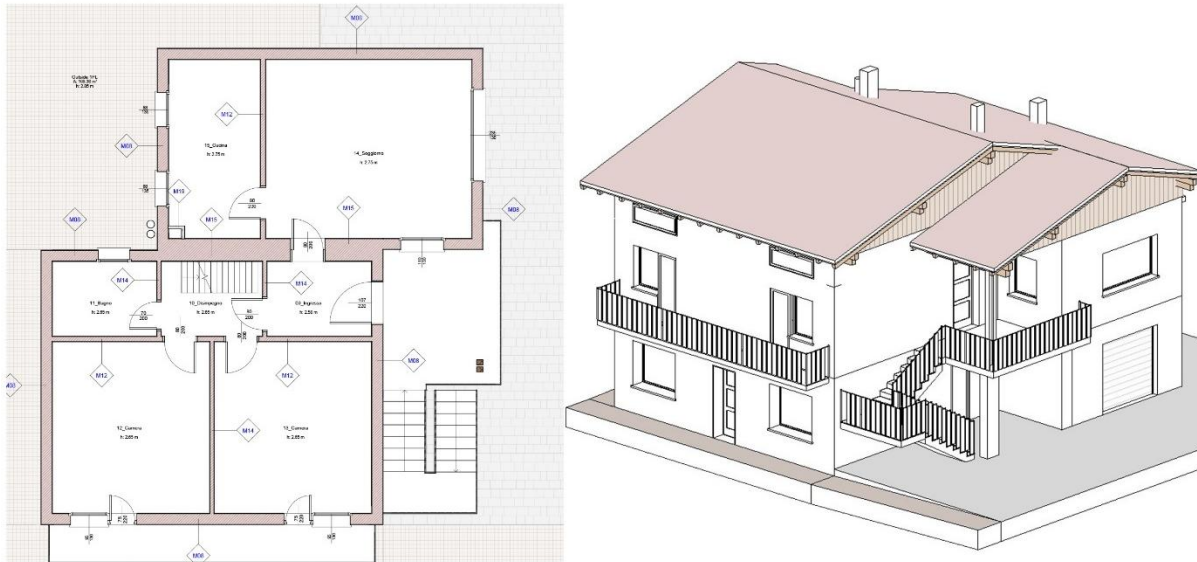


Fig. 2.8: Edificio residenziale convenzionale

2.3.2 C.S. 2: KTH Live-In Lab

L'edificio, altamente monitorato, rappresenta il test ideale per la vastità e la quantità di dati monitorati, configurandosi come un contesto nel quale si dovrebbe idealmente operare anche nel caso degli edifici storici, come si vedrà nel C.S.3. Situato all'interno del campus del Royal Institute of Technology (KTH) di Stoccolma (Fig. 2.9), l'edificio è costituito da 90 appartamenti,

di superficie compresa tra i 16 e i 26 m² ciascuno, tutti provvisti di cucina e bagno autonomi, e può ospitare complessivamente 104 studenti. In ogni appartamento sono presenti tre sensori, che monitorano sia le condizioni ambientali (temperatura, umidità, CO₂) sia i consumi energetici. Tuttavia, tali dati non sono attualmente associati a una visualizzazione diretta all'interno di modelli tridimensionali, rendendo così meno immediata e poco funzionale la procedura di raccolta, consultazione e interpretazione delle informazioni.

L'edificio rappresenta uno dei testbed che vengono gestiti dal Live-In Lab [176], laboratorio collocato al piano interrato dell'edificio preso in esame (testbed EM, Fig. 2.10).



Fig. 2.9: Testbed EM: Edificio Malvinas väg - Live-In Lab

KTH Live-In Lab è una piattaforma per l'innovazione accelerata nel settore immobiliare e per la collaborazione tra il mondo accademico e quello imprenditoriale. La maggior parte dei testbed del KTH Live-In Lab è gestita in ambienti reali, al fine di sperimentare e validare nuove tecnologie e nuovi metodi.

Lo scopo di KTH Live-In Lab è ridurre il tempo intercorrente tra i risultati dei test della ricerca e la loro introduzione sul mercato. In questo modo, la piattaforma mira a favorire lo sviluppo di edifici sostenibili ed efficienti dal punto di vista delle risorse.

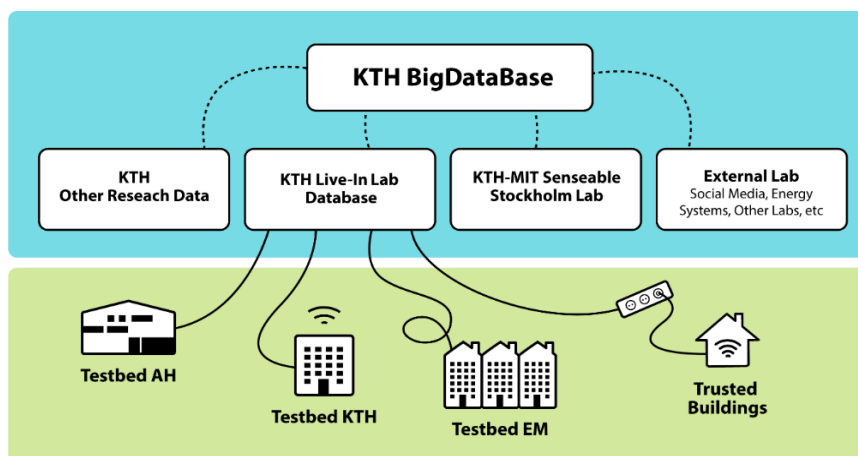


Fig. 2.10: Testbed gestiti dal KTH (fonte: KTH Live-In Lab)

Il Live-In Lab deve il suo nome alla peculiarità di avere al di sopra di esso (al piano terra dell'edificio utilizzato come caso studio, Fig. 2.11) un'area di circa 100 m² adibita ad alloggi per studenti. Tali ambienti sono stati progettati per essere completamente reversibili sotto il profilo della configurazione interna degli spazi, così da consentire modifiche successive in funzione dei dati di consumo rilevati e analizzati dal laboratorio, con l'obiettivo di individuare configurazioni ottimali in grado di garantire un equilibrio tra contenimento dei consumi energetici e comfort degli utenti.

Al di sopra degli spazi gestiti direttamente dal Live-In Lab, si trovano gli alloggi utilizzati come casi studio nella presente ricerca.

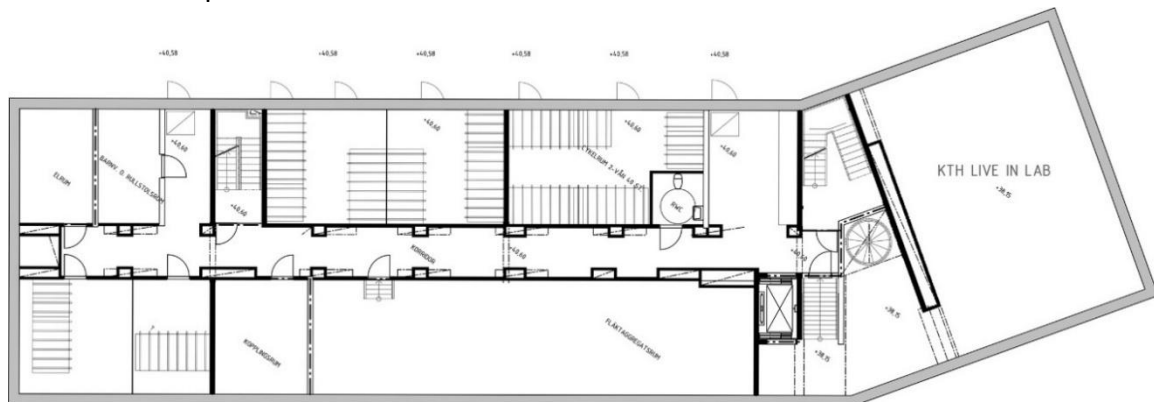


Fig. 2.11: Testbed EM - KTH Live-In Lab

2.3.3 C.S. 3: Gallerie dell'Accademia di Venezia

Il terzo caso studio riguarda le Gallerie dell'Accademia di Venezia (Fig. 2.12), uno dei musei più importanti d'Italia per la conservazione e valorizzazione del patrimonio pittorico veneto, con collezioni che spaziano dal XIV al XVIII secolo.

Le Gallerie dell'Accademia si trovano nel sestiere di Dorsoduro, ai piedi del ponte dell'Accademia, in quello che fino all'inizio del XIX secolo era il vasto complesso formato dalla chiesa di Santa Maria della Carità, dal convento dei Canonici Lateranensi e dalla Scuola Grande. Prendono il nome dall'Accademia di Belle Arti, che le ha aperte nel 1817 e ne ha condiviso la sede fino al 2004.

Si tratta quindi di un edificio storico vincolato, il cui contenuto richiede particolare attenzione sotto il profilo del controllo climatico ai fini della corretta conservazione delle opere.

Ciò lo rende il caso studio ideale per testare la duttilità dei sistemi proposti nella presente ricerca anche in ambito HBIM. Le Gallerie costituiscono inoltre un caso emblematico e trasferibile ad altri musei e complessi monumentali italiani ed europei.

Nello specifico, tre sale al primo piano (Sala I, II, XXIII) in fase di ristrutturazione e quindi più agevoli da rilevare, sono state restituite in modelli HBIM. Successivamente, si è deciso di concentrare le analisi e le sperimentazioni della metodologia proposta sulla sala XXIII, ritenuta la più significativa in termini di complessità spaziale e presenza di vincoli storico-architettonici.



Fig. 2.12: Gallerie dell'Accademia di Venezia

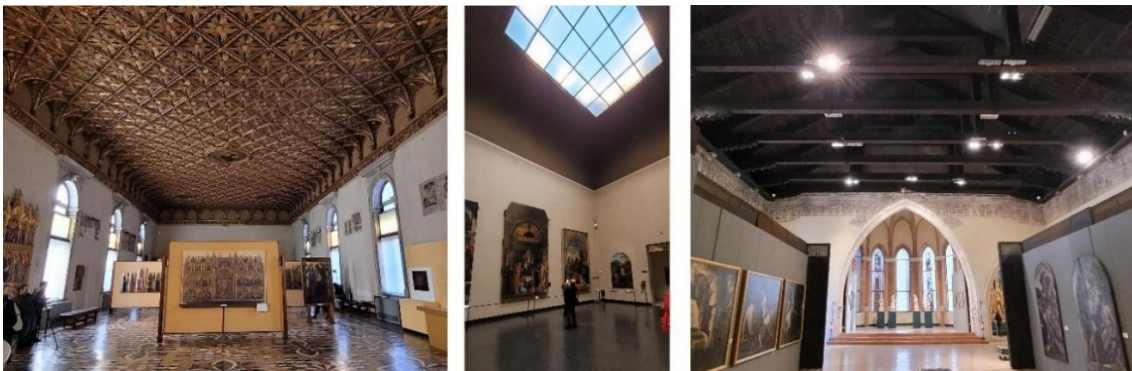


Fig. 2.13: Sala I (sinistra), Sala II (centro), Sala XXIII (destra)

I tre casi studio, riassunti in Tab. 2.6, permettono di testare la metodologia in contesti tra loro molto differenti, spaziando dagli edifici residenziali ordinari, agli edifici di nuova realizzazione altamente monitorati, fino agli edifici storici vincolati. Questa progressione evidenzia la scalabilità e la duttilità dell'approccio proposto, mostrando come esso possa adattarsi a condizioni operative e a vincoli di natura molto diversa.

Caso studio	Tipologia edificio	Contesto	Criticità e valore per la ricerca
C.S.1 Edificio residenziale convenzionale	Edificio residenziale standard.	Patrimonio edilizio "ordinario".	Rappresenta la casistica più comune dell'edilizia residenziale, con edifici spesso scarsamente isolati e privi di sensoristica. Utile come base di confronto per edifici esistenti non vincolati.
C.S.2 Live-In Lab KTH	Edificio per alloggi studenteschi.	Campus universitario altamente monitorato.	Elevata quantità di dati disponibili ma difficoltà nella loro visualizzazione in modo efficace e intuitivo. Dimostra il potenziale dell'integrazione IoT-BIM in ambienti controllati e ricchi di sensoristica.
C.S.3 Gallerie dell'Accademia di Venezia	Complesso monumentale storico adibito a museo.	Edificio vincolato di pregio storico-artistico.	Edificio ricco di vincoli conservativi, controllo del microclima fondamentale per la conservazione delle opere, difficoltà nell'integrazione di impianti. Caso emblematico che unisce esigenze di conservazione e di efficienza energetica, ideale per testare l'approccio HBIM + IoT.

Tab. 2.6: Casi studio

3 RISULTATI

Nei paragrafi seguenti viene descritta nel dettaglio l'architettura informatica utilizzata e, attraverso l'applicazione ai casi studio, viene dimostrata la scalabilità del flusso di lavoro proposto.

3.1 Finalità applicative

Lo scopo della ricerca è dimostrare come l'analisi delle prestazioni termiche degli edifici, il monitoraggio basato sui dati raccolti dai sensori e l'interazione con gli ambienti attraverso sondaggi rivolti agli utenti costituiscano ambiti strettamente interconnessi, in particolare nel contesto degli edifici storici. Un'attenta programmazione degli interventi migliorativi sotto il profilo del comfort degli utenti, senza al contempo compromettere l'integrità del patrimonio storico, rappresenta il presupposto fondamentale per una corretta gestione e manutenzione del costruito.

Per questo motivo, le analisi termiche e le attività di monitoraggio risultano strettamente interdipendenti: senza il monitoraggio non è infatti possibile verificare se quanto previsto in fase progettuale rientri nei parametri considerati accettabili. Allo stesso tempo, il monitoraggio dei dati, se non supportato da parametri di riferimento e da modelli di confronto, rende complessa la loro interpretazione e la conseguente pianificazione di interventi correttivi.

Infine, la possibilità di acquisire feedback sia da parte degli utenti che dei manutentori consente di ottenere un riscontro reale tra le condizioni percepite e le previsioni formulate in fase di progetto e successivamente oggetto di monitoraggio.

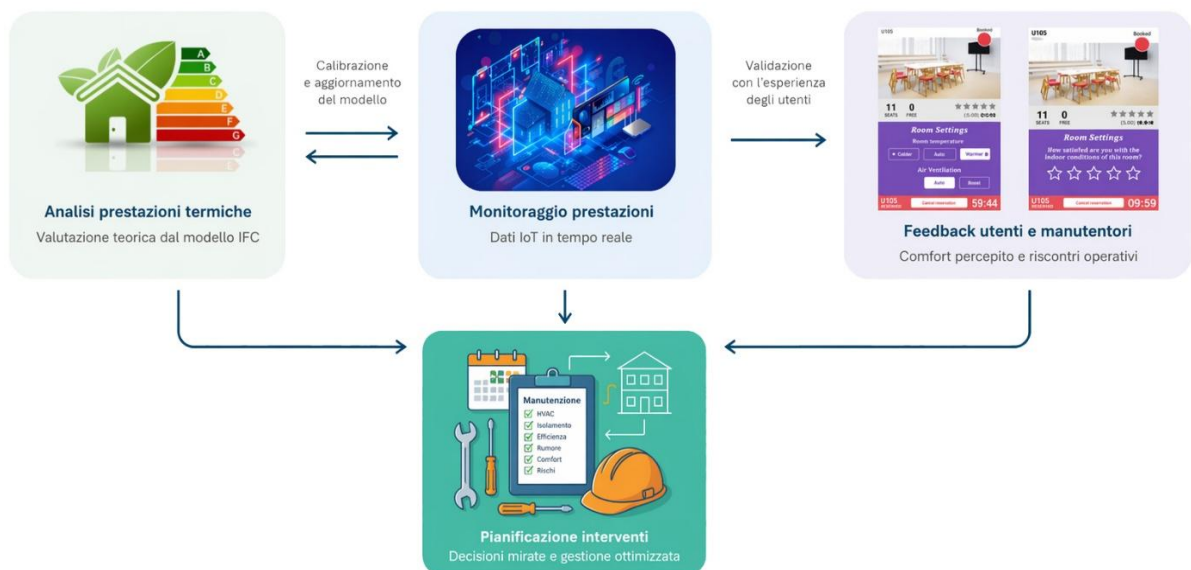


Fig. 3.1: Interazione tra i diversi ambiti legati al FM

Questi ambiti, opportunamente messi in relazione tra loro (Fig. 3.1), consentono non solo di individuare guasti e criticità, ma anche di attivare tempestivamente procedure di segnalazione e apertura di ticket per la manutenzione, supportando in modo efficace le attività decisionali del Facility Manager.

Tale processo coinvolge diverse figure professionali e componenti software, come schematizzato in Fig. 3.2. In questo contesto, il BIM Manager assume un ruolo di coordinamento nella definizione delle regole di modellazione e dei requisiti informativi (IDS), inclusa la selezione e l'adozione di dizionari di dati condivisi tramite bSDD, mentre il BIM Modeler implementa tali indicazioni all'interno del modello IFC as-built.

Parallelamente, il Sensor Provider e l'IoT Data Integrator operano sulla rete di sensori e sull'infrastruttura informatica, garantendo la corretta acquisizione, gestione e strutturazione dei dati, che vengono successivamente elaborati tramite script Python e collegati dinamicamente al modello informativo. Inoltre, sia le figure professionali addette alla manutenzione sia gli utenti che occupano gli ambienti monitorati hanno la possibilità di fornire feedback sullo stato dei luoghi, segnalando eventuali problematiche.

All'interno di questo ambiente integrato, il Facility Manager accede al modello IFC arricchito dai dati di monitoraggio e dai feedback degli utenti e dei manutentori, visualizzati e analizzati tramite strumenti open source quali Blender e Bonsai, al fine di supportare le attività di gestione, monitoraggio e pianificazione degli interventi. Le interazioni tra i diversi attori, evidenziate nel diagramma dalle connessioni tratteggiate, sottolineano la necessità di una collaborazione continua, che va oltre il semplice scambio di dati tecnici e si configura come un processo coordinato di supporto alle decisioni.

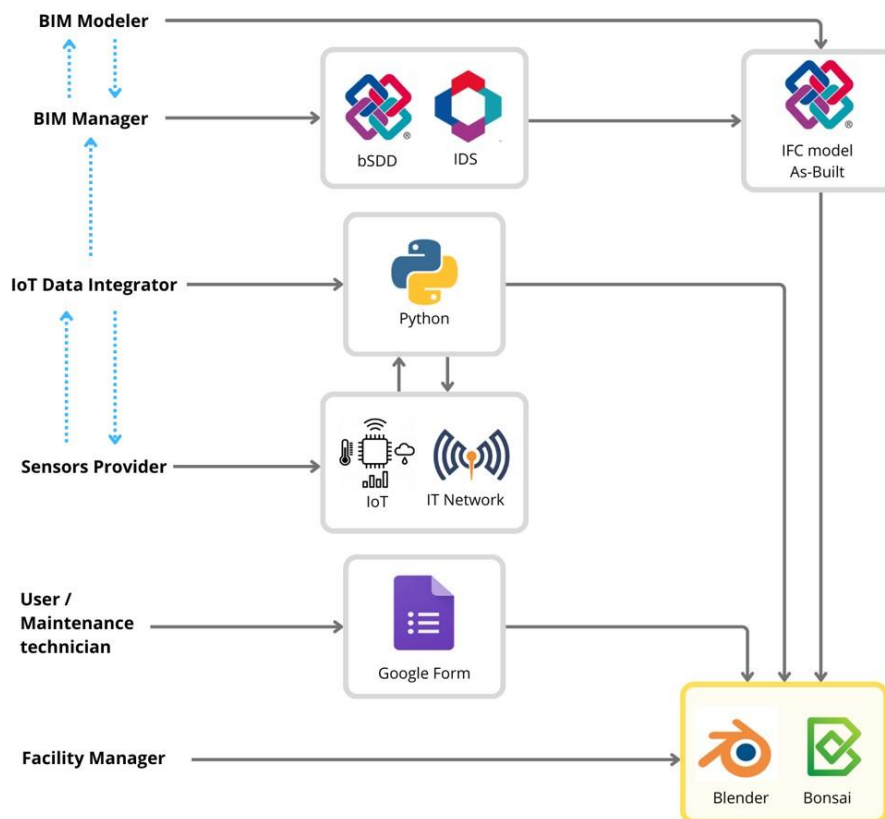


Fig. 3.2: Interazione tra figure professionali e strumenti per il Facility Management

L'ultima parte della ricerca è quindi incentrata sulla definizione di un metodo per l'individuazione e la rappresentazione dei vincoli presenti negli edifici, nonché sull'analisi delle possibili modalità di intervento compatibili con le esigenze di conservazione.

Nei paragrafi successivi vengono approfonditi i principali strumenti software impiegati, dapprima analizzando le soluzioni attualmente disponibili sul mercato, al fine di delinearne lo stato dell'arte, e successivamente presentando le alternative rese possibili dall'impiego di soluzioni open source e freeware.

3.1.1 Modellazione BIM/HBIM

Per realizzare il file di interscambio IFC del modello all'interno del quale visualizzare i dati rilevati dalla sensoristica IoT, nel presente lavoro ci si è avvalsi del software Autodesk Revit (Fig. 3.3).

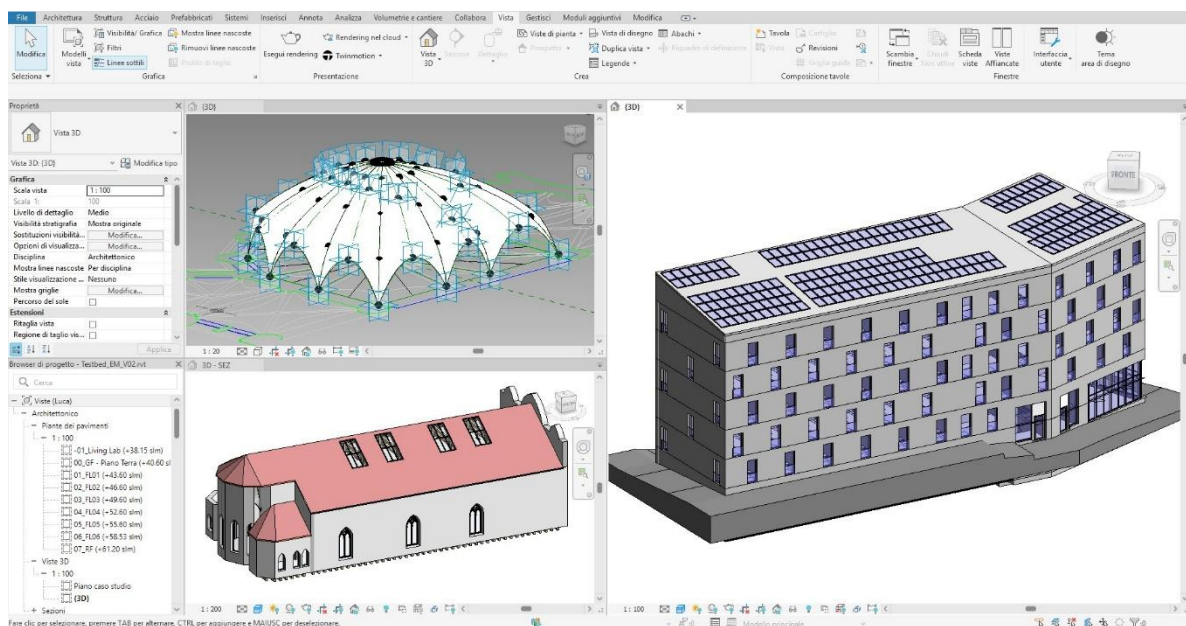


Fig. 3.3: Modellazione BIM in Autodesk Revit

Nel mercato sono presenti diversi software di modellazione BIM, quali, ad esempio, Allplan (Nemetschek), ArchiCAD (Graphisoft, tra i primi software ad interfacciarsi con la metodologia BIM), Edificius (ACCA Software), solo per citarne alcuni. Tuttavia è possibile affermare che, nel settore architettonico, Revit di Autodesk rappresenti uno dei software di modellazione più utilizzati [177].

Nel contesto HBIM, rivolto agli edifici storici, la modellazione richiede strumenti in grado di gestire geometrie irregolari e componenti complessi. Strumenti integrati in Revit come Dynamo consentono di automatizzare operazioni ripetitive e di creare logiche parametriche avanzate, facilitando la rappresentazione di elementi storici non standard.

Inoltre, Dynamo offre la possibilità di sviluppare script personalizzati per le analisi termiche o il monitoraggio di parametri provenienti da sensori IoT, integrandoli nel modello ed evidenziando le informazioni richieste (ad esempio tramite la chiara identificazione di murature con vincoli architettonici e che vanno preservate, messe in risalto rispetto agli elementi non vincolati).

Va tuttavia sempre considerato che un modello BIM per essere maggiormente efficace, dovrebbe contenere esclusivamente le informazioni necessarie allo scopo per il quale viene realizzato, al fine di evitare un'eccessiva quantità di dati non utili allo scopo.

Nel presente lavoro si è cercato di ottenere un bilanciamento tra la fedeltà geometrica degli elementi e i dati relativi agli aspetti termici e di monitoraggio, così da ottenere un modello affidabile ma al contempo facilmente aggiornabile in tempo reale. Ad esempio, nel caso studio relativo alle Gallerie dell'Accademia, per la Sala XXIII si è scelto di semplificare la facciata esterna, omettendo la modellazione degli elementi decorativi non rilevanti ai fini del monitoraggio delle prestazioni dell'edificio. L'attenzione si è invece concentrata sugli ambienti interni, fondamentali per la corretta determinazione delle volumetrie, e sulle componenti impiantistiche presenti (Fig. 3.4).

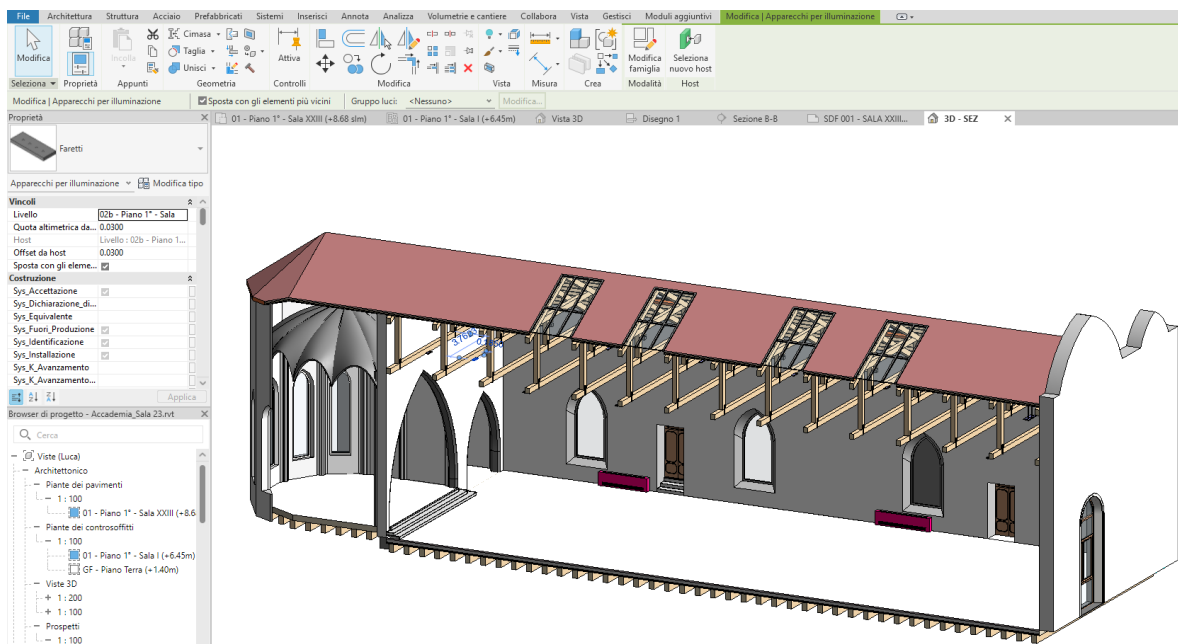


Fig. 3.4: Gallerie dell'Accademia di Venezia. Sala XXIII

Una volta definita la modellazione delle geometrie e degli impianti dell'edificio da monitorare, il modello può essere arricchito con tutte le informazioni non visive necessarie allo scopo quali, ad esempio, le caratteristiche delle stratigrafie delle murature per la determinazione delle trasmittanze termiche, oppure la classificazione dei locali per individuare quelli riscaldati e la tipologia di impianto di riscaldamento, qualora il modello sia destinato ad analisi energetiche. Nel caso di monitoraggi IoT, i sensori e i gateway che si occupano della trasmissione dei dati ai server possono essere modellati e, attraverso specifiche proprietà, definiti in ogni singolo aspetto (Fig. 3.5): dall'esatta collocazione, utile nel caso di interventi manutentivi, al tipo di dato monitorato, fino alle modalità di comunicazione con i server che ospitano i database. Trattandosi di numerose informazioni altamente specifiche, come verrà approfondito nel paragrafo successivo, non tutte risultano disponibili all'interno dei parametri standard previsti dal software.

Per rispondere a tale esigenza è possibile ricorrere alla creazione di parametri personalizzati (parametri di progetto) oppure di parametri condivisi, organizzati in specifici Property Set, qualora sia necessario garantirne uniformità e riutilizzabilità in più file. In questo modo si

assicura che i dati necessari siano strutturati in maniera coerente e risultino facilmente esportabili per le successive analisi.

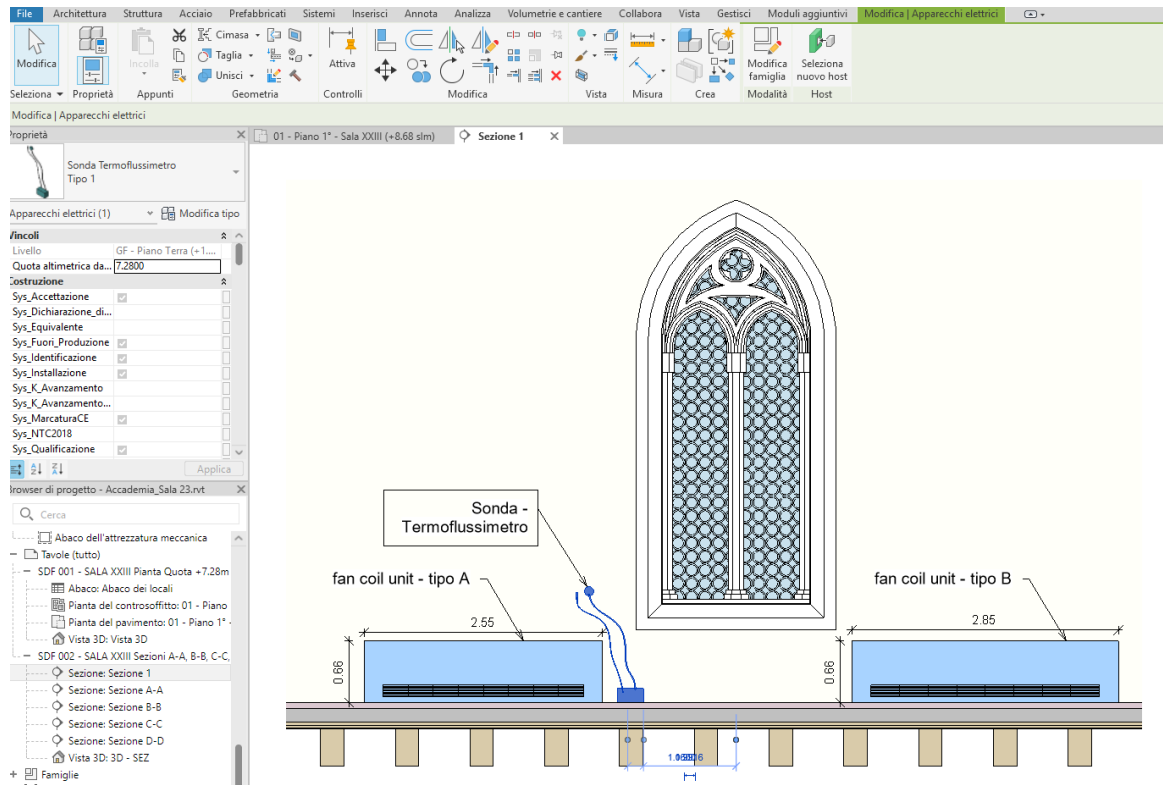


Fig. 3.5: Modellazione degli elementi tecnici

Un ulteriore aspetto rilevante per le analisi energetiche è rappresentato dalla geolocalizzazione dell'edificio (Fig. 3.6), che determina la zona climatica di riferimento e, conseguentemente, i limiti di trasmittanza e i requisiti da rispettare secondo normativa.

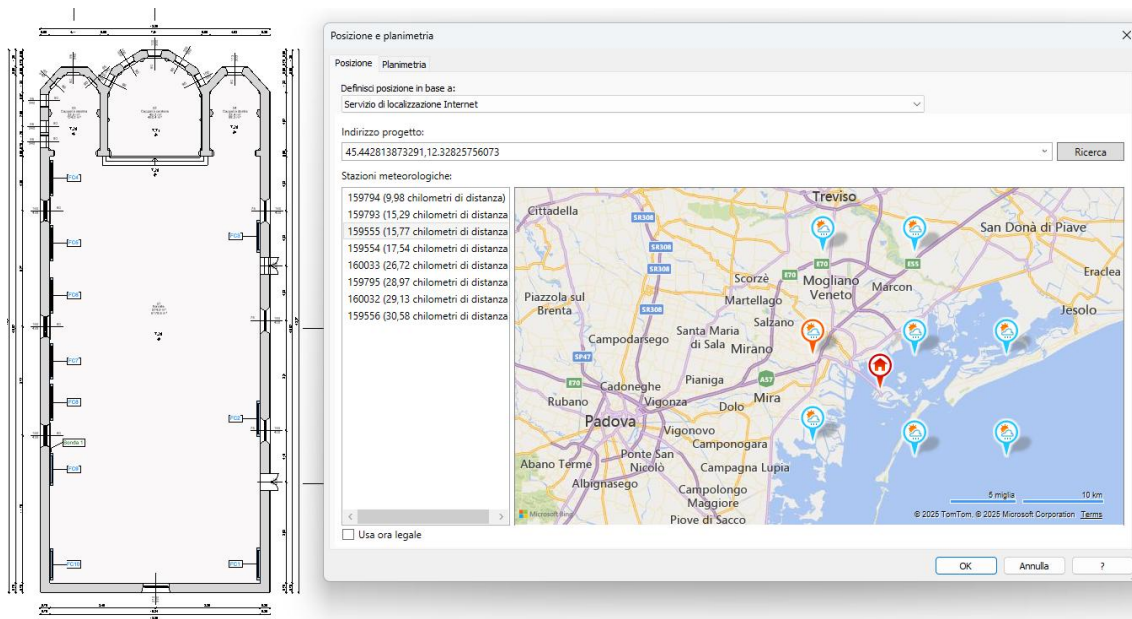


Fig. 3.6: Geolocalizzazione dell'edificio

Ultimate le fasi di inserimento delle informazioni in Revit, è possibile procedere con l'esportazione del modello nel formato di interscambio IFC. All'interno di Revit è possibile, sulla base della versione ufficiale 4.3 dello standard IFC, personalizzare ulteriormente il livello di dettaglio desiderato con informazioni aggiuntive necessarie allo scopo per il quale il modello è stato realizzato. Ciò è reso possibile grazie alla possibilità di personalizzare le MVD (Model View Definition) sulla base di quelle previste dallo standard. Le MVD costituiscono dei "filtri" che definiscono quali informazioni del modello IFC devono essere esportate in funzione dello specifico obiettivo.

Nel caso di modelli destinati ad analisi energetiche è possibile, ad esempio, specificare il livello di delimitazione dei vani: nella presente ricerca viene utilizzato il cosiddetto "secondo livello", che consente di esportare le superfici di delimitazione insieme ai dati necessari al calcolo dei consumi energetici e dei flussi termici. È inoltre possibile estendere le MVD standard includendo ulteriori proprietà (ad esempio l'esportazione di parametri specifici definiti dall'utente relativi alla stratigrafia delle pareti o alla trasmittanza termica), così da fornire agli strumenti di simulazione un set di informazioni completo. In questo modo il modello risulta più accurato sia nella definizione dei volumi sia nella stima degli scambi termici.

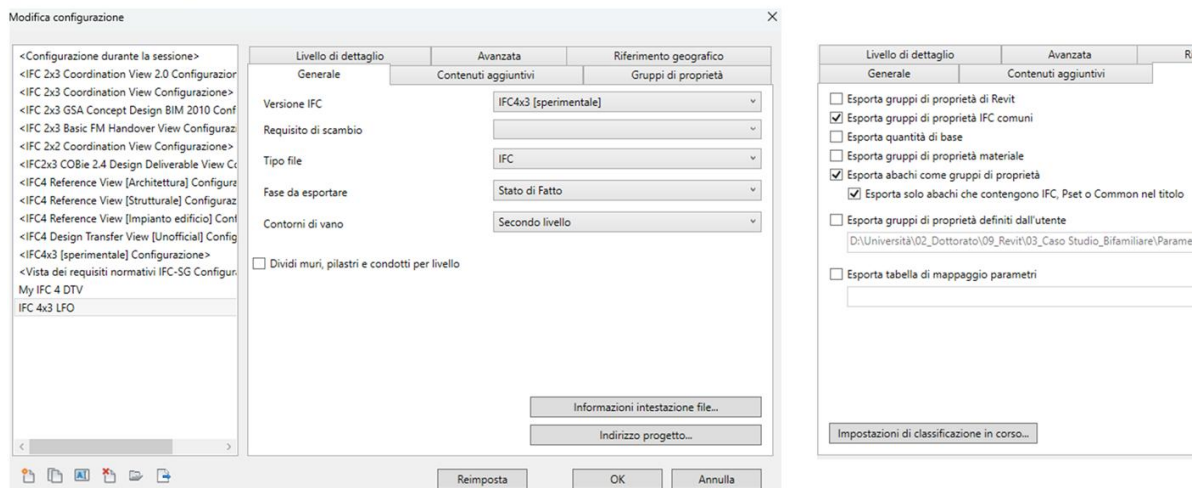


Fig. 3.7: Esportazione del modello in formato IFC

Definite tutte le caratteristiche dell'esportazione, è possibile procedere alla creazione del file IFC (Fig. 3.7), che rappresenta il punto di partenza per le successive analisi in ottica open source. È pertanto necessario garantirne la coerenza con gli standard IFC, al fine di renderlo idoneo alle future analisi termiche e alle attività di gestione delle informazioni legate al Facility Management mediante strumenti open source.

3.1.2 Standard openBIM

Nell'ottica della presente ricerca, lo schema IFC si rivela una risorsa imprescindibile, in quanto il modello di dati consente di definire entità in grado di rappresentare anche elementi propri del settore IoT. Un'entità chiave nelle attività oggetto del presente lavoro è rappresentata dal concetto di sensore. Il formato IFC presenta infatti una classe, denominata `IfcSensor`, deputata alla trasmissione di informazioni inerenti a dispositivi di rilevamento, quali appunto i sensori. Essa è stata introdotta nella versione IFC4 ed è definita come: "a device that measures a

physical quantity and converts it into a signal which can be read by an observer or by an instrument” [178].

La versione 4.3 dello standard IFC, l’ultima rilasciata ufficialmente, presenta 55 Property Set associati alla classe IfcSensor. Come noto, ogni classe viene definita attraverso attributi e Property Set. In particolare, il tipo del sensore nella classe IfcSensor viene specificato dall’attributo PredefinedType, sulla base del quale possono essere collegati specifici Property Set.

Ad esempio, all’entità IfcSensor.TEMPERATURESENSOR (del tipo IfcSensorTypeEnum) può essere collegato il Pset_SensorTypeTemperatureSensor nel quale vengono specificati il tipo di sensore di temperatura e l’eventuale set-point correlato. Dei 55 Property Set dedicati, ben 29 sono utilizzabili solo a seguito della specifica di un determinato PredefinedType, come ad esempio IfcSensor/TEMPERATURESENSOR o IfcSensor/CO2SENSOR.

È stato quindi analizzato il contenuto di ciascun Property Set e verificata la completezza informativa associabile a tali proprietà rispetto alle caratteristiche che si ritengono necessarie per la trasmissione dei dati in ambito IoT. Di seguito vengono elencate e discusse le caratteristiche considerate:

1. Dislocazione e rappresentazione geometrica dei sensori di misura.

Il sensore può essere rappresentato con una forma geometrica semplificata avente dimensioni pari alle dimensioni massime del sensore nella realtà, e posizionato all’interno del modello in corrispondenza della sua collocazione effettiva.

Un esempio riuscito di come la semplificazione di geometrie complesse possa rendere un’informazione intuitiva e quindi efficace per chi deve utilizzarla è rappresentato dalla mappa della metropolitana di Londra realizzata da Harry Beck [179]. Le geometrie schematizzate raffiguranti le linee della metropolitana, pur non rappresentando fedelmente la realtà, enfatizzano il concetto secondo cui una rappresentazione semplificata può risultare più efficace nel contesto di utilizzo, in quanto l’inserimento di troppi dati risulterebbe non solo superfluo ma anche confusionario.

È inoltre opportuno relazionare il sensore alle entità IFC cui si riferisce la grandezza misurata. Ad esempio, un sensore di temperatura superficiale dovrebbe essere posto in esplicita relazione con la superficie di cui misura la temperatura. È infine opportuno rappresentare anche la posizione e la forma, pur semplificata, dei gateway, mettendoli in relazione con i sensori di cui ricevono il segnale.

2. Principali caratteristiche dei sensori di misura.

I sensori possono essere descritti attraverso le seguenti caratteristiche.

- a) Identificazione.

Il sensore deve essere identificabile nel panorama commerciale, in modo da poter reperire la documentazione e i software necessari alla gestione operativa del dispositivo. A tal fine risultano utili le seguenti informazioni:

- Produttore;
- Modello;
- Numero di serie.

- b) Accuratezza di misura.

Un'adeguata conoscenza dell'accuratezza di misura consente di migliorare l'affidabilità delle rilevazioni e di identificare eventuali condizioni di incoerenza nei dati. Ad esempio, due rilevazioni a breve distanza, come può capitare per due sensori in vicina sequenza in un circuito di distribuzione dell'acqua calda/fredda, possono fornire dati non coerenti a causa di una diversa incertezza di misura.

A tal fine possono risultare utili le seguenti informazioni:

- Tipo di sensore, utile per risalire alla funzione di calibrazione, nel caso di sensori normati;
- Espressione dell'accuratezza dichiarata, a seguito di taratura;
- Ultima data di taratura/calibrazione, utile per definire l'eventuale necessità di una nuova taratura/calibrazione;
- Funzione di calibrazione, utile per migliorare l'accuratezza di misura.

c) Autonomia operativa:

- Durata nominale della batteria e relative condizioni di riferimento, per consentire all'utente di prevedere i tempi di sostituzione di eventuali batterie.

3. Collegamento con il server o con file che contengono le misure.

I dati di monitoraggio non possono essere registrati direttamente all'interno del file IFC, al fine di limitare la dimensione del file IFC stesso; essi devono dunque essere reperibili tramite un server o un file esterno. Per raggiungere questo obiettivo risultano utili le seguenti informazioni.

a) Identificazione del database e del parametro:

- Indirizzo del server o nome e percorso del file;
- Nome della tabella contenente i dati;
- Denominazione del sensore lato server o file;
- ID utente e password per l'accesso.

b) Esempi di query:

- Formati e query da utilizzare per il reperimento dei dati dal server o dal file, così da rendere il reperimento del dato rapidamente eseguibile dall'utente, senza la necessità di impiegare tempo nella dettagliata analisi del database (nel caso di grandi sistemi di monitoraggio, la struttura del database può essere significativamente complessa e richiedere know-how e risorse che diminuiscono le possibilità di fruire dei dati raccolti);
- Tipo di grandezza monitorata, per definire se, nel caso di calcolo di un valore di sintesi che coinvolga più letture, esse debbano essere mediate (nel caso, tipicamente, di grandezze intensive) o sommate (nel caso, tipicamente, di grandezze estensive);
- Query da utilizzare per la lettura di grandezze operative accessorie, quali l'autonomia residua e lo stato di funzionamento o errore.

Un'ulteriore serie di informazioni riguardanti modalità e stili di visualizzazione dei dati potrebbe risultare utile nel caso fosse necessario standardizzare anche questo tipo di parametri. Tali informazioni, rispetto a quelle viste in precedenza, possono considerarsi opzionali, essendo molteplici le loro combinazioni e soggettive nella scelta.

Sarebbe comunque utile poter trasmettere, attraverso il file *.ifc* o file referenziati e contenuti nel CDE, i seguenti parametri/opzioni per una visualizzazione di base:

- Modalità di rappresentazione ed eventuali sotto-opzioni:
 - Diagramma (sotto-opzioni: tipi di diagramma);
 - Rappresentazione 3D;
- Valori minimo e massimo della scala di rappresentazione;
- Set di colori di rappresentazione;
- Altri parametri grafici (spessore della linea, tratteggiatura, tipo di indicatore, ecc.).

Il confronto dei Property Set disponibili nella classe IfcSensor (Fig. 3.8) ha evidenziato alcune lacune rispetto al soprastante elenco di informazioni necessarie.

I Property Set che descrivono l'entità IfcSensor, resa disponibile in modo nativo da buildingSMART, non sono infatti in grado di descrivere tutte le caratteristiche dei sensori sopra proposte.

Nelle righe seguenti vengono illustrate le principali motivazioni:

- I Property Set che descrivono singoli tipi di sensori, (ad esempio Pset_SensorTypeConductanceSensor, Pset_SensorTypeContactSensor, ecc.), che rappresentano complessivamente circa 30 Property Set della classe IfcSensor, non forniscono una descrizione sufficientemente approfondita del sensore, ma indicano principalmente l'intervallo previsto dei valori rilevati. Alcuni di essi includono proprietà che possono descrivere brevemente il tipo di sensore (ad esempio, TemperatureSensorType), ma senza ulteriori dettagli. Anche un Property Set della tipologia di sensore tra le più comuni, come quello relativo alla misurazione della temperatura, Pset_SensorTypeTemperatureSensor, presenta poche informazioni, oltretutto poco coerenti; ad esempio, i valori di set-point come SetPointTemperature, dovrebbero riguardare i regolatori piuttosto che i sensori;
- Il Property Set Pset_ServiceLife e i Property Set relativi alla manutenzione (Pset_RepairOccurrence, Pset_SensorTypeCommon, Pset_SensorPHistory) possono essere utilizzati per definire lo stato di funzionamento e programmare azioni di calibrazione, sostituzione della batteria o altri interventi straordinari sul sensore. Tuttavia, il loro utilizzo non è esplicitamente citato nella documentazione ufficiale;
- I Property Set Pset_Tolerance e Pset_Uncertainty sono destinati alle informazioni di posizionamento, quindi non hanno alcuna applicazione utile nella descrizione dei sensori.

Gli altri Property Set risultano invece comuni a diverse entità IFC e non sono quindi specificamente concepiti per la rappresentazione dei sensori. Da un lato includono proprietà generiche che possono risultare utili anche in ambito sensoristico (ad esempio la proprietà SerialNumber del Pset_ManufacturerOccurrence, applicabile anche a tutte le sottoclassi di IfcElement, quali IfcWall, IfcDoor, ecc.); dall'altro lato molte delle proprietà contenute in tali set non risultano effettivamente applicabili alla descrizione o alla gestione dei sensori.

Pset_AxleCountingEquipment WHEELSENSOR FailureInformation DetectionRange OperationalTemperatureRange	Pset_Condition AssessmentDate AssessmentCondition AssessmentDescription	Pset_ConstructionAdministration ProcurementMethod SpecificationSectionNumber SubmittalIdentifier
Pset_ConstructionOccurrence InstallationDate ModelNumber TagNumber	Pset_ElectricalDeviceCommon RatedCurrent RatedVoltage NominalFrequencyRange	Pset_ElectricalDeviceCompliance ElectroMagneticStandardsCompliance ExplosiveAtmosphereStandardsCompliance FireProofStandardsCompliance
Pset_ElementKinematics CyclicPath CyclicRange LinearPath	Pset_EnergyRequirements EnergyConsumption PowerDemand EnergySourceLabel	Pset_EnvironmentalCondition ReferenceAirRelativeHumidity ReferenceEnvironmentTemperature MaximumAtmosphericPressure
Pset_EnvironmentalEmissions CarbonDioxideEmissions SulphurDioxideEmissions NitrogenOxideEmissions	Pset_EnvironmentallImpactIndicators Reference FunctionalUnitReference IndicatorUnit	Pset_EnvironmentallImpactValues TotalPrimaryEnergyConsumption WaterConsumption HazardousWaste
Pset_InstallationOccurrence InstallationDate AcceptanceDate PutIntoOperationDate	Pset_MaintenanceStrategy AssetCriticality AssetFrailty AssetPriority	Pset_MaintenanceTriggerCondition ConditionTargetPerformance ConditionMaintenanceLevel ConditionReplacementLevel
Pset_MaintenanceTriggerDuration DurationTargetPerformance DurationMaintenanceLevel DurationReplacementLevel	Pset_MaintenanceTriggerPerformance TargetPerformance PerformanceMaintenanceLevel ReplacementLevel	Pset_ManufacturerOccurrence AcquisitionDate BarCode SerialNumber
Pset_ManufacturerTypeInfoInformation GlobalTradeItemNumber ArticleNumber ModelReference	Pset_RepairOccurrence RepairContent RepairDate MeanTimeToRepair	Pset_Risk RiskName RiskType NatureOfRisk
Pset_SensorPHistory Value Direction Quality	Pset_SensorTypeCO2Sensor CO2SENSOR SetPointCO2Concentration	Pset_SensorTypeCommon Reference Status
Pset_SensorTypeConductanceSensor CONDUCTANCESENSOR SetPointConductance	Pset_SensorTypeContactSensor CONTACTSENSOR SetPointContact	Pset_SensorTypeEarthquakeSensor EARTHQUAKESENSOR MarginOfError LinearVelocityResolution SamplingFrequency
Pset_SensorTypeFireSensor FIRESENSOR FireSensorSetPoint AccuracyOfFireSensor TimeConstant	Pset_SensorTypeFlowSensor FLOWSENSOR SetPointFlow	Pset_SensorTypeForeignObjectDetectionSensor FOREIGNOBJECTDETECTIONSENSOR WorkingState SerialInterfaceType ForeignObjectDetectionSensorType
Pset_SensorTypeFrostSensor FROSTSENSOR SetPointFrost	Pset_SensorTypeGasSensor GASENSOR GasDetected SetPointConcentration CoverageArea	Pset_SensorTypeHeatSensor HEATSENSOR CoverageArea SetPointTemperature RateOfTemperatureRise
Pset_SensorTypeHumiditySensor HUMIDITYSENSOR SetPointHumidity	Pset_SensorTypeIdentifierSensor IDENTIFIERSENSOR SetPointIdentifier	Pset_SensorTypeIonConcentrationSensor IONCONCENTRATIONSENSOR SubstanceDetected SetPointIonConcentration
Pset_SensorTypeLevelSensor LEVELSENSOR SetPointLevel	Pset_SensorTypeLightSensor LIGHTSENSOR SetPointIlluminance	Pset_SensorTypeMoistureSensor MOISTURESENSOR SetPointMoisture
Pset_SensorTypeMovementSensor MOVEMENTSENSOR MovementSensingType SetPointMovement	Pset_SensorTypePHSensor PHSENSOR SetPointPH	Pset_SensorTypePressureSensor PRESSURESENSOR SetPointPressure IsSwitch
Pset_SensorTypeRadiationSensor RADIATIONSENSOR SetPointRadiation	Pset_SensorTypeRadioactivitySensor RADIOACTIVITYSENSOR SetPointRadioactivity	Pset_SensorTypeRainSensor RAINSENSOR MarginOfError SamplingFrequency WorkingState
Pset_SensorTypeSmokeSensor SMOKESENSOR CoverageArea SetPointConcentration HasBuiltInAlarm	Pset_SensorTypeSnowSensor SNOWDEPTHSENSOR MarginOfError SamplingFrequency DataCollectionType	Pset_SensorTypeSoundSensor SOUNDSENSOR SetPointSound
Pset_SensorTypeTemperatureSensor TEMPERATURESENSOR TemperatureSensorType SetPointTemperature	Pset_SensorTypeTurnoutClosureSensor TURNOUTCLOSURESENSOR DetectionRange IndicationRodMovementRange	Pset_SensorTypeWindSensor WINDSENSOR WindSensorType SetPointSpeed DampingRatio
Pset_ServiceLife ServiceLifeDuration MeanTimeBetweenFailure	Pset_Tolerance ToleranceDescription ToleranceBasis OverallTolerance	Pset_Uncertainty UncertaintyBasis UncertaintyDescription HorizontalUncertainty
Pset_Warranty WarrantyIdentifier WarrantyStartDate	Qto_BodyGeometryValidation GrossSurfaceArea NetSurfaceArea	Qto_SensorBaseQuantities GrossWeight

Fig. 3.8: Pset ufficiali della classe IfcSensor (fonte: ifc43-docs.standards.buildingsmart.org)

Una volta analizzate le proprietà attualmente presenti nello standard per quanto riguarda la sensoristica, è stato proposto un dizionario bSDD specifico per i sensori, che raccolga le proprietà esistenti ritenute idonee, integrandole con nuove create ad hoc.

Il bSDD personalizzato, denominato “IoT”, ha lo scopo di trasmettere le informazioni precedentemente elencate che risultano effettivamente necessarie e non delegabili a documenti allegati nel CDE (Common Data Environment).

Nella tabella seguente (Tab. 3.1) ne vengono indicate le caratteristiche, con la motivazione per cui si ritiene che lo specifico parametro non sia delegabile a un file esterno.

Nome	Codice	Tipo di dato	Descrizione	Perché nel bSDD	Grado di priorità (10 necessario – 0 non rilevante)
<i>SensorId</i> (IsEqualTo: AssetIdentifier IFC4.3 schema in Pset_ConstructionOccurrence)	IoTp001	String	Riferimento all'istanza specifica del sensore all'interno del modello. (es.: TempSensor_01_MeetingRoom)	Può essere utile avere il riferimento dell'istanza all'interno del modello (lato modellazione BIM).	6
<i>Manufacturer</i> (IsEqualTo: Manufacturer IFC4.3 schema in Pset_ManufacturerTypeInfoInformation)	IoTp002	String	Organizzazione che ha prodotto o assemblato il dispositivo. (es.: Sensor Productor)	Facilita l'identificazione del dispositivo (gestione ricambi, accesso a manuali, ecc.).	7
<i>Model</i> (IsEqualTo: ModelLabel IFC4.3 schema in Pset_ManufacturerTypeInfoInformation)	IoTp003	String	Nome del modello assegnato dal produttore. (es.: QAA2012)	Come sopra.	7
<i>SerialNumber</i> (IsEqualTo: ArticleNumber IFC4.3 schema in Pset_ManufacturerTypeInfoInformation)	IoTp004	String	Codice identificativo univoco assegnato dal produttore. (es.: SN-TEMP-45678)	Come sopra.	7
<i>InstallationDate</i> (IsEqualTo: InstallationDate IFC4.3 schema)	IoTp005	String	Data di installazione del dispositivo. (es.: 14/05/2023)	Utile per pianificare tarature o manutenzioni.	7
<i>SensorType</i>	IoTp006	String	Definisce la gamma dei diversi tipi di sensori che possono essere specificati. Equivalente a IfcSensorTypeEnum. (es.: IoTp006-8: CO2SENSOR)	Facilita la comprensione del dato atteso.	8
<i>AccuracyGrade</i>	IoTp007	String	Grado di accuratezza della misura. (es.: ±0.3°C)	Aumenta la consapevolezza del dato ottenuto.	6
<i>CalibrationDate</i> (IsEqualTo: AssessmentDate IFC4.3 schema)	IoTp008	String	Data dell'ultima calibrazione del sensore. (es.:14/05/2024)	Importante per pianificare nuove calibrazioni.	7
<i>CalibrationFrequency</i>	IoTp009	String	Frequenza con cui deve essere effettuata la calibrazione. (es.: Annuale)	Come sopra.	7
<i>AdjustmentFunction</i>	IoTp010	String	Coppia di valori: valore letto dallo strumento e valore di riferimento. (es.:Verifica calibrazione sensore tramite sonda di riferimento)	Indicazioni su come eseguire la calibrazione dello strumento.	6

<i>NominalBatteryLife</i>	<i>IoTp011</i>	<i>String</i>	<i>Valore di durata della batteria. (es.: 5 anni)</i>	<i>Importante per la gestione ordinaria dello strumento.</i>	<i>7</i>
<i>BatteryLifeReferenceConditions</i>	<i>IoTp012</i>	<i>String</i>	<i>Condizioni di lavoro a cui fa riferimento la durata della batteria. (es.:100 stream al giorno)</i>	<i>Necessario per capire l'effettiva durata della batteria a seconda dell'utilizzo dello strumento.</i>	<i>7</i>
<i>ServerURI</i>	<i>IoTp013</i>	<i>String</i>	<i>L'indirizzo al quale è possibile trovare la pagina preliminare di informazioni relative alla persona o all'organizzazione. (es.: https://iot-server.buildingcompany.com)</i>	<i>Necessario per accedere al database.</i>	<i>10</i>
<i>ServerTableName</i>	<i>IoTp014</i>	<i>String</i>	<i>Indica la tabella di riferimento per reperire dati all'interno del database. (es.:SensorData_Temperature)</i>	<i>Necessario per accedere al database.</i>	<i>10</i>
<i>ServerSensorName</i>	<i>IoTp015</i>	<i>String</i>	<i>Nome del sensore all'interno del database. (es.: TempSensor_01)</i>	<i>Il sensore lato server potrebbe avere una codifica specifica, differente da quella di fabbrica.</i>	<i>10</i>
<i>ServerDataRetrievalQuery</i>	<i>IoTp016</i>	<i>String</i>	<i>Indica le query da utilizzare per leggere i dati all'interno del database. (es. codice SQL: SELECT * FROM SensorData_Temperature WHERE SensorID = 'TempSensor_01' AND Timestamp > NOW() - INTERVAL '1 day')</i>	<i>Istruzioni su come reperire le informazioni all'interno del database.</i>	<i>9</i>
<i>MeasuredPhysicalQuantity</i>	<i>IoTp017</i>	<i>String</i>	<i>Tipo di grandezza fisica misurata (es.: Celsius, °C)</i>	<i>Necessario per conoscere il tipo di dato monitorato.</i>	<i>10</i>
<i>ServerStatusRetrievalQuery</i>	<i>IoTp018</i>	<i>String</i>	<i>Indica le query da utilizzare per leggere i dati all'interno del database per conoscere grandezze operative quali l'autonomia residua e lo stato di funzionamento / errore. (es: SELECT * FROM SensorData_Status WHERE SensorID = 'TempSensor_01' AND Timestamp > NOW() - SENSOR)</i>	<i>Istruzioni su come reperire le informazioni all'interno del database.</i>	<i>4</i>

Tab. 3.1: Proprietà del dizionario bSDD - IoT

Il dizionario è stato pubblicato nell'apposito portale online creato da buildingSMART [180] e, grazie all'utilizzo di software come Blender-Bonsai, è possibile associarlo direttamente agli elementi che costituiscono il modello IFC (Fig. 3.9).

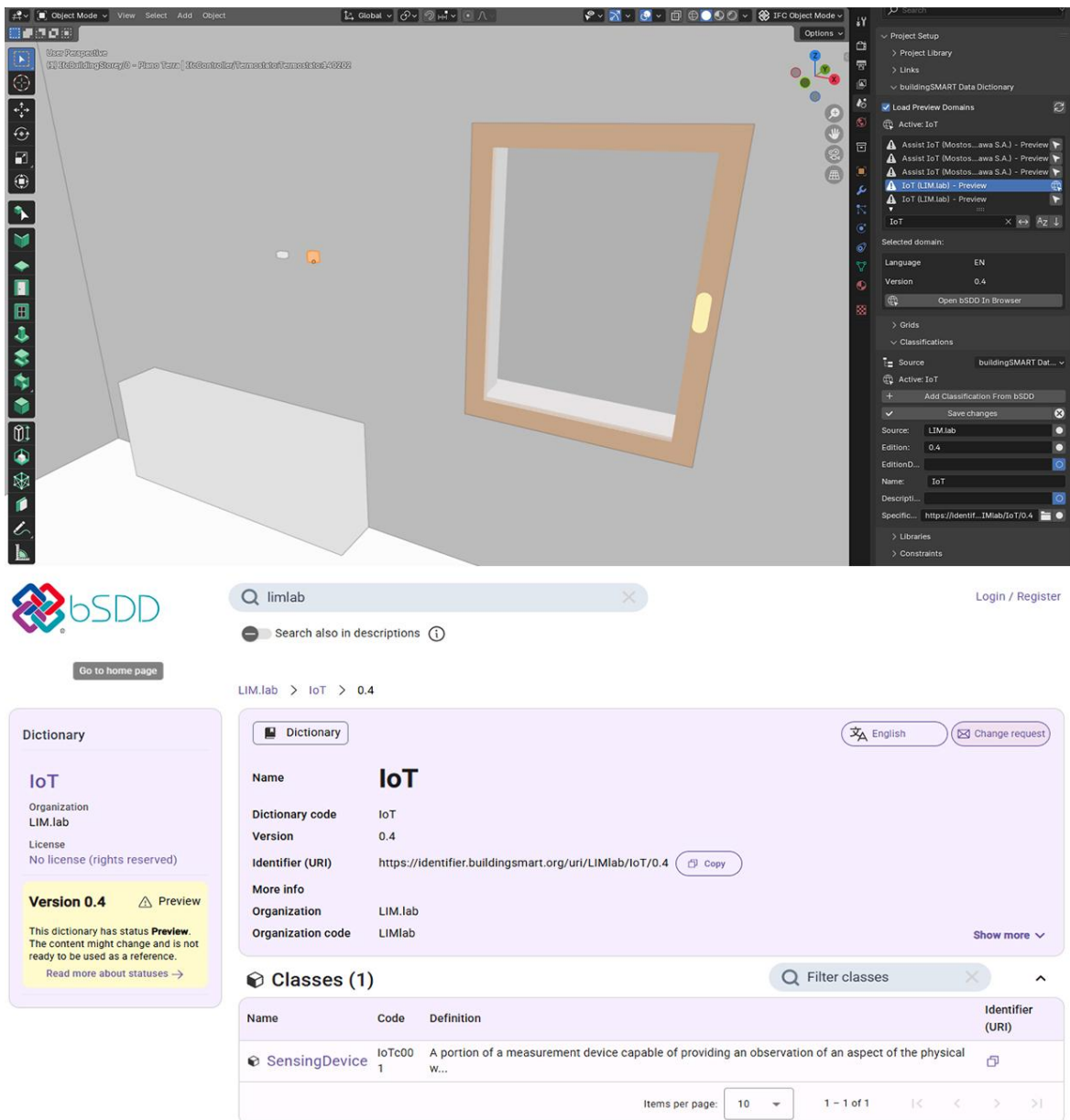


Fig. 3.9: bSDD IoT e Blender-Bonsai

Una volta pubblicato il dizionario, esso può essere utilizzato per supportare le analisi relative alle prestazioni degli edifici, se impiegato in combinazione con IDS (Information Delivery Specification).

Come illustrato in precedenza, l'IDS consente di verificare che il file IFC sia stato esportato correttamente, senza errori o perdita di dati, e che contenga tutte le caratteristiche richieste dall'utente, ossia i cosiddetti requisiti informativi. Tra questi può essere indicato anche l'utilizzo di uno specifico dizionario, in questo caso quello relativo alla sensoristica IoT, in modo da garantire che tutti gli attori coinvolti nel progetto operino sulla base della stessa struttura informativa.

Oltre a questo, è possibile definire ulteriori requisiti. Tra i principali, in ambito energetico, si possono individuare (Fig. 3.10):

- Geolocalizzazione dell'intervento, per la determinazione della zona climatica e dei relativi limiti di trasmittanze, prestazioni, ecc.;

- Tipologia di edificio (residenza, uffici, ospedali, ecc.);
- Classificazione del tipo di intervento (nuova costruzione, ristrutturazione importante di primo livello, ampliamento, ecc.);
- Identificazione dei locali riscaldati e quelli non riscaldati;
- Tipologia di climatizzazione (riscaldamento, raffrescamento, solo ventilazione naturale, ecc.);
- Classificazione degli elementi dell'involucro edilizio confinanti con zone esterne o ambienti non riscaldati, al fine di determinare quali siano soggetti a verifiche prestazionali e quali invece ne siano esenti;
- Modalità d'uso dell'edificio, ovvero l'indicazione per ogni vano della destinazione d'uso e dei relativi dati quali, ad esempio, l'occupazione massima, ricambi d'aria, e altri parametri necessari alle analisi energetiche;
- Collegamento a uno spazio ACDat condiviso, nel quale è possibile archiviare documenti utili come, ad esempio, le bollette energetiche, al fine di ricostruire l'andamento dei consumi dell'edificio nel tempo.

Documento valido		Specifiche		
	Nome	Descrizione	Istruzioni	
<input type="checkbox"/>	1 Types Of Building	Gli edifici sono classificati, in base alla loro destinazione d'uso, nelle categorie di cui all'articolo 3 del D.P.R. 412/93: - E.1 Edifici adibiti a residenza e assimilabili - E.2 Edifici adibiti a uffici e assimilabili - E.3 Edifici adibiti ad ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili - E.4 Edifici adibiti ad attività ricreative, associative o di culto e assimilabili - E.5 Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili - E.6 Edifici adibiti ad attività sportive - E.7 Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili - E.8 Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili	Inserire il para "Informazioni" previsti.	
<input type="checkbox"/>	2 Types Of Intervention	I tipi di interventi previsti (D.M. 26 giugno 2015 - Decreto requisiti minimi) sono: - Nuova costruzione - Demolizione e ricostruzione - Ampliamento e sopraelevazione - Ristrutturazione importante di I livello - Ristrutturazione importante di II livello - Riqualificazione energetica	Inserire il para "Informazioni"	
<input type="checkbox"/>	3 Geolocalization	Orientare correttamente l'edificio rispetto al Nord reale è necessario per ottenere analisi corrette riguardo il percorso del sole e degli ombreggiamenti. Verificare che l'IFC esportato mantenga l'orientamento del nord reale e non quello di progetto.	- Geolocalizza l'indirizzo di progetto). - In	
<input type="checkbox"/>	4 Climate Zone	Il DPR 412/93 stabilisce destinazioni d'uso degli immobili e suddivide il territorio italiano in sei zone climatiche, dalla A alla F, in base al criterio dei Gradi Giorno. Criteri questi, fondamentali per la progettazione degli impianti di climatizzazione e la definizione del periodo di accensione e durata. Il "Grado Giorno" di una località, è la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente, convenzionalmente fissata a 20°C, e la temperatura media esterna giornaliera. - Zona A: comuni con gradi giorno inferiori a 600 - Zona B: comuni con gradi giorno tra 600 e 900 - Zona C: comuni con gradi giorno tra 900 e 1.400 - Zona D: comuni con gradi giorno tra 1.400 e 2.100 - Zona E: comuni con gradi giorno tra 2.100 e 3.000 - Zona F: comuni con gradi giorno superiori a 3.000	Inserire il para "Informazioni" F) relativa alla	
<input type="checkbox"/>	5 Shading	La modellazione del contesto, comprensiva di tutti gli oggetti che creano ombreggiamenti all'edificio di riferimento, è necessaria per una corretta diagnosi energetica.	Esportare i modelli (ingombri, ecc)	
<input type="checkbox"/>	6 Heated Room	I tipi di climatizzazione previsti sono: - Riscaldamento - Raffreddamento - Riscaldamento e raffreddamento - Senza climatizzazione - Ventilazione - Soltanto ventilazione naturale	In fase di mod ambienti e ind	

Fig. 3.10: Specifiche IDS

Una volta soddisfatti tutti i requisiti dell'IDS e validato il modello, l'utente ha la garanzia di poter procedere correttamente con le successive elaborazioni e analisi. Tramite specifici script Python, e in particolare utilizzando il toolkit open source IfcOpenShell, in grado di leggere ed elaborare i dati contenuti all'interno del file IFC, è possibile sviluppare procedure per il calcolo di indicatori relativi alle prestazioni degli edifici, come ad esempio la verifica delle trasmittanze termiche e la proposta di interventi migliorativi.

Ad esempio, nel caso in cui si voglia verificare la trasmittanza degli elementi opachi di un edificio sulla base dei limiti imposti dal Decreto Ministeriale 26 giugno 2015 relativo ai requisiti minimi, è possibile procedere interrogando il modello IFC attraverso le specifiche IDS inerenti alla geolocalizzazione e alle caratteristiche delle stratigrafie.

Una volta verificata la presenza di tali informazioni all'interno del file IFC, è possibile ricavare, mediante Python e IfcOpenShell, le coordinate geografiche dell'edificio e i relativi gradi giorno (GG) necessari all'identificazione della zona climatica.

Avendo inoltre definito tra i requisiti del file IDS la classificazione di tutte le zone riscaldate o non riscaldate del modello, lo script Python può individuare automaticamente quali elementi opachi siano soggetti a verifica e se tali verifiche risultino soddisfatte. A tal fine vengono calcolate, sempre all'interno dello stesso codice, le trasmittanze termiche degli elementi e confrontate con i limiti previsti dalla normativa, letti da un file JSON esterno che funge da database contenente i valori di riferimento.

Questo esempio mostra come sia possibile sviluppare strumenti open source a supporto della progettazione degli interventi, in grado di velocizzare le verifiche energetiche, proporre soluzioni di miglioramento e favorire un processo decisionale più consapevole già nelle prime fasi progettuali.

3.1.3 Streaming e visualizzazione dati

La trasmissione dei dati rilevati all'interno degli ambienti, sia nel caso delle soluzioni basate su software proprietari sia su software open source, è resa possibile nel presente lavoro grazie al microprocessore Wi-Fi Arduino MKR WiFi 1010, in grado di inviare i dati senza dover essere collegato ad altri dispositivi. Per quanto riguarda le misurazioni, è stato utilizzato un sensore DHT22 per rilevare temperatura e umidità. Questi componenti, a basso costo e facilmente configurabili (Fig. 3.11), hanno costituito la base iniziale per tutte le successive configurazioni sperimentate nel corso della ricerca.

La scheda può essere alimentata da una batteria collegata alla porta dedicata, rendendola di fatto indipendente da un'alimentazione fissa. È richiesta soltanto una connessione Wi-Fi, che consente l'invio automatico dei dati verso l'ambiente di raccolta e la loro successiva elaborazione.

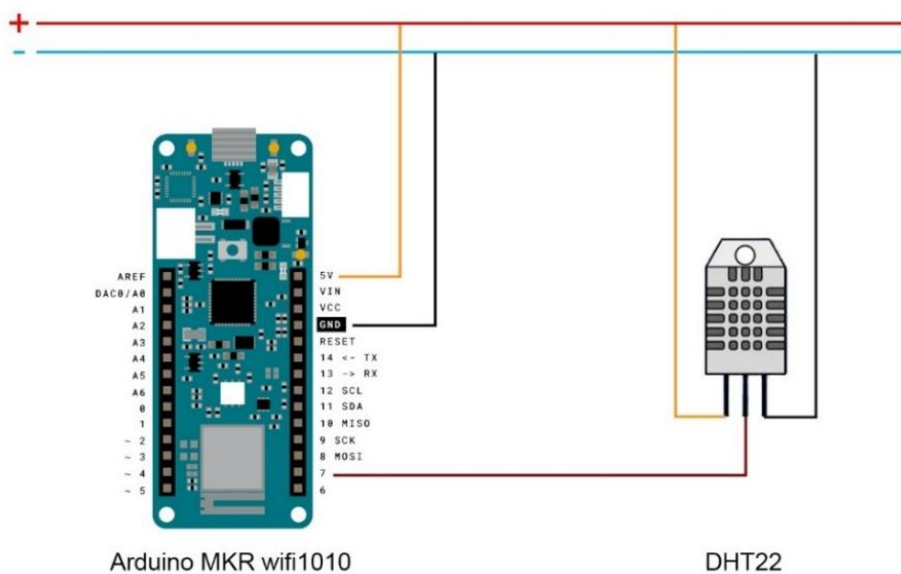


Fig. 3.11: Arduino MKR WiFi 1010 e sensore di temperatura e umidità DHT22

La programmazione della scheda è stata effettuata tramite l'ambiente di sviluppo integrato Arduino IDE (Fig. 3.12), sfruttando le librerie ufficiali per la gestione della connessione Wi-Fi e

per l'acquisizione dei dati dal sensore (ad esempio le librerie WiFiNINA e DHT). Questo ha consentito di predisporre in modo semplice e flessibile l'invio automatico dei dati verso la piattaforma di raccolta. Grazie ai pin di ingresso e uscita digitali e analogici della scheda Arduino, è inoltre possibile collegare ulteriori sensori (ad esempio sensori di luminosità, CO₂ o particolato), rendendo l'architettura hardware facilmente espandibile e scalabile.

L'ambiente di sviluppo, open source e multiplatforma, permette inoltre di monitorare in tempo reale il flusso dei dati tramite il Serial Monitor e di aggiornare rapidamente il firmware della scheda con eventuali modifiche del codice, senza necessità di riconfigurazioni hardware.

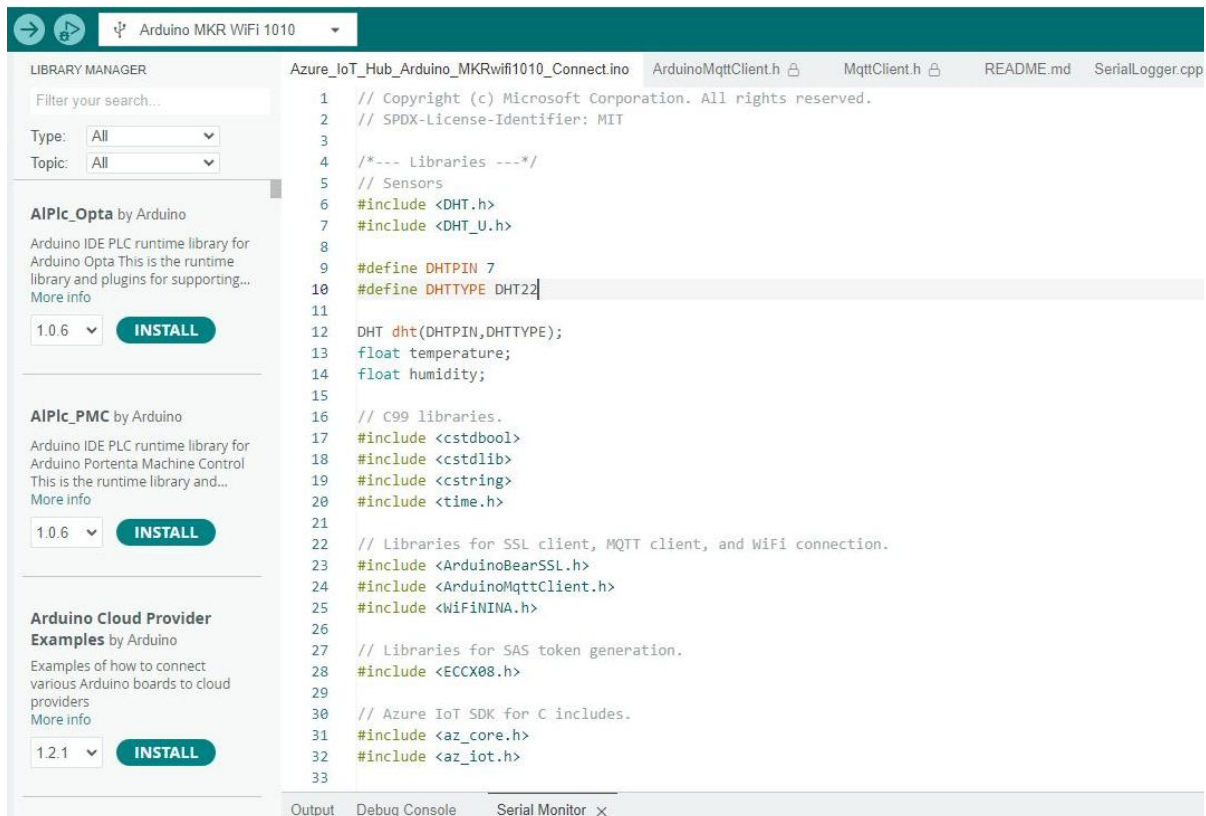


Fig. 3.12: Arduino IDE

I dati raccolti possono essere visualizzati all'interno della piattaforma online di Arduino, Arduino Cloud, che consente di gestire, monitorare e controllare i dispositivi IoT direttamente via web (anche mediante applicazioni mobili).

Tramite Arduino Cloud è quindi possibile, oltre alla visualizzazione del dato, effettuare operazioni di controllo da remoto. Si pensi, ad esempio, all'accensione o allo spegnimento di un determinato punto luce qualora il sensore rilevi l'assenza di persone nell'ambiente monitorato.

Nel contesto del presente lavoro, Arduino è stato utilizzato come base di trasmissione dei dati (Fig. 3.13) per la loro successiva visualizzazione all'interno di modelli 3D, funzionalità non prevista dalla piattaforma Arduino Cloud.

Come si vedrà nei paragrafi successivi, sono state inizialmente testate modalità di integrazione tramite software proprietari abbinati ad Arduino; successivamente si è cercato di replicare il medesimo risultato utilizzando esclusivamente software open source e freeware.

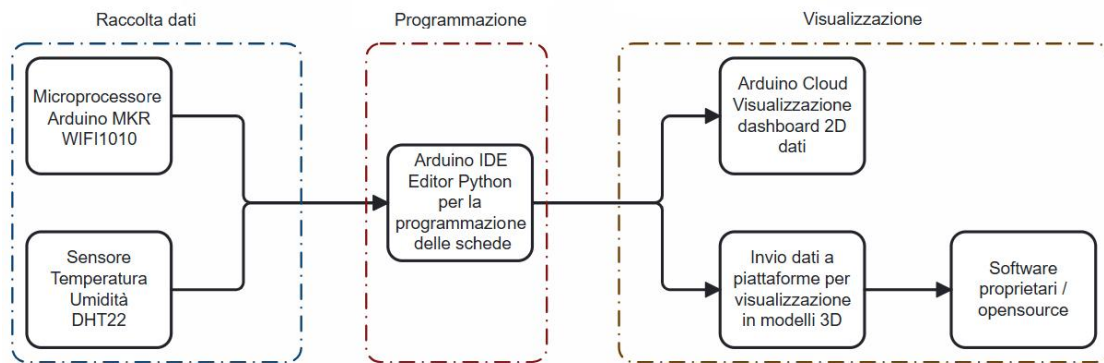


Fig. 3.13: Procedure per la raccolta e la visualizzazione dei dati IoT

3.1.3.1 Streaming di dati tramite software proprietari

Una volta raccolti i dati dal sensore tramite Arduino IDE, questi possono essere inviati a Microsoft Azure, la piattaforma cloud pubblica di Microsoft che offre servizi di cloud computing attraverso la propria infrastruttura globale (Fig. 3.14).

La piattaforma è composta da numerosi moduli che, opportunamente configurati, consentono la raccolta, l'elaborazione e il collegamento dei dati ad altri sistemi di visualizzazione.

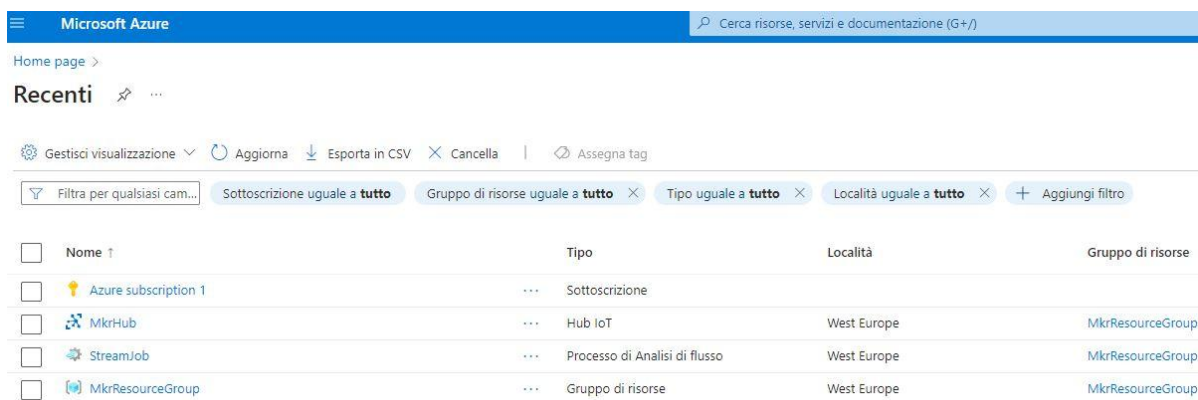


Fig. 3.14: Microsoft Azure

Per lo streaming di dati è stato innanzitutto utilizzato IoT Hub, al quale è stato assegnato "MkrResourceGroup" come nome del gruppo di risorse, al fine di mantenere chiaro il riferimento alla scheda MKR utilizzata.

IoT Hub svolge il ruolo di intermediario tra i dispositivi IoT e le applicazioni lato server. Al suo interno vengono definiti l'IoT Hub name, in questo caso "MkrHub", che identifica in modo univoco l'istanza del servizio, e il Device ID, che rappresenta il singolo dispositivo registrato. Queste informazioni vengono poi inserite in Arduino IDE (Fig. 3.15), consentendo di stabilire la comunicazione diretta tra la scheda (Arduino MKR WiFi 1010) e la piattaforma cloud Microsoft Azure.

Per la visualizzazione dei dati raccolti e gestiti tramite l'infrastruttura Microsoft Azure, sono stati utilizzati due software: Microsoft Power BI per la visualizzazione di dashboard bidimensionali e Autodesk Tandem, per la visualizzazione dei dati all'interno dei modelli IFC. Nello specifico:

- Microsoft Power BI, piattaforma Microsoft per l'analisi, la visualizzazione e la condivisione dei dati in modo interattivo. Essa risulta facilmente integrabile nell'architettura descritta, poiché è sufficiente indicare la sorgente dei dati per ottenere delle dashboard bidimensionali aggiornate in tempo reale;
- Autodesk Tandem, soluzione proprietaria specificamente sviluppata per applicazioni di Digital Twin. Tandem consente di associare in modo nativo le informazioni provenienti da sensori IoT agli oggetti del modello IFC, visualizzando in tempo reale i parametri misurati (ad esempio temperatura o umidità associati ai relativi locali IFC nei quali sono collocati i sensori) e facilitando le attività di Facility Management e di manutenzione. È inoltre possibile personalizzare diversi aspetti della visualizzazione, dalla rappresentazione grafica dei valori rilevati alla definizione di alert automatici nel caso di superamento di determinati valori soglia. Anche in questo caso la connessione ad Azure risulta particolarmente intuitiva: è infatti sufficiente indicare all'interno di Tandem a quale IoT Hub e Device ID fanno riferimento gli elementi del modello.

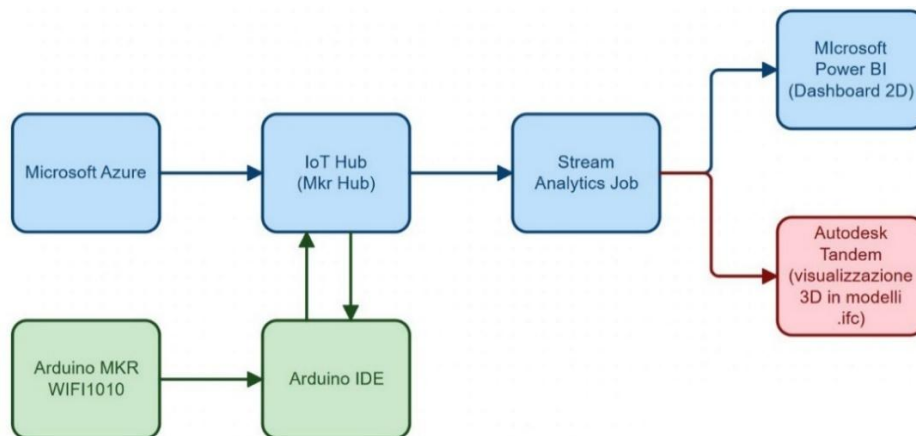


Fig. 3.17: Streaming dei dati mediante software proprietari

Questo tipo di configurazione, schematizzata in Fig. 3.17 con una colorazione dei blocchi che rispecchia l'ecosistema tecnologico di appartenenza (Blu – Microsoft, Verde – Arduino, Rosso – Autodesk), rappresenta un'architettura tipica dei sistemi IoT commerciali per la gestione di Digital Twin, basata su servizi cloud proprietari integrati.

Essa presenta sia vantaggi sia alcune complessità, che vengono di seguito elencati.

Vantaggi della soluzione basata su software proprietari:

- Infrastruttura scalabile: Azure IoT Hub offre la possibilità di gestire in modo sicuro un numero elevato di dispositivi e consente una facile espansione del sistema;
- Integrazione diretta con ecosistemi BIM proprietari: Autodesk Tandem è progettato per collegarsi a modelli Revit e IFC e rappresentare un gemello digitale aggiornato in tempo reale;
- Riduzione dei tempi di sviluppo: la disponibilità di servizi cloud già preconfigurati limita la necessità di infrastrutture server personalizzate;

Criticità:

- Dipendenza da licenze e costi: sia Azure IoT Hub che Autodesk Tandem sono servizi a pagamento, con costi variabili in funzione del numero di dispositivi connessi e del volume di dati;
- Difficoltà di applicazione per progetti di piccole o medie dimensioni;
- Lock-in tecnologico: l'utilizzo di ecosistemi proprietari può rendere complessa una futura migrazione verso soluzioni open source o multiplatforma.

Una volta ottenuto il risultato atteso in termini di visualizzazione dei dati mediante software proprietari, si è quindi cercato di replicare l'approccio adottato utilizzando esclusivamente software open source e freeware.

3.1.3.2 Streaming di dati tramite software open source

Analogamente a quanto visto precedentemente, anche per testare le procedure basate su software open source la base di partenza è costituita dai dati rilevati dai sensori e processati tramite Arduino. In questo caso, tuttavia, le letture vengono trasmesse mediante il protocollo di comunicazione MQTT, nello specifico utilizzando Eclipse Mosquitto, opportunamente configurato all'interno di Arduino IDE.

Mosquitto (Fig. 3.18) è un broker, ovvero un componente che gestisce la comunicazione tra dispositivi MQTT, open source. In termini semplificati, può essere assimilato a un "centralino" dei messaggi MQTT, che consente la comunicazione in tempo reale tra diversi dispositivi e servizi in modo semplice ed efficiente. Ad esempio, i dati ricevuti da sensori di temperatura possono essere pubblicati in uno specifico topic; Mosquitto li riceve e li distribuisce ai client, come un'applicazione di monitoraggio o un database, sottoscritti a quel topic.

Questa architettura lo rende particolarmente adatto alle applicazioni IoT.

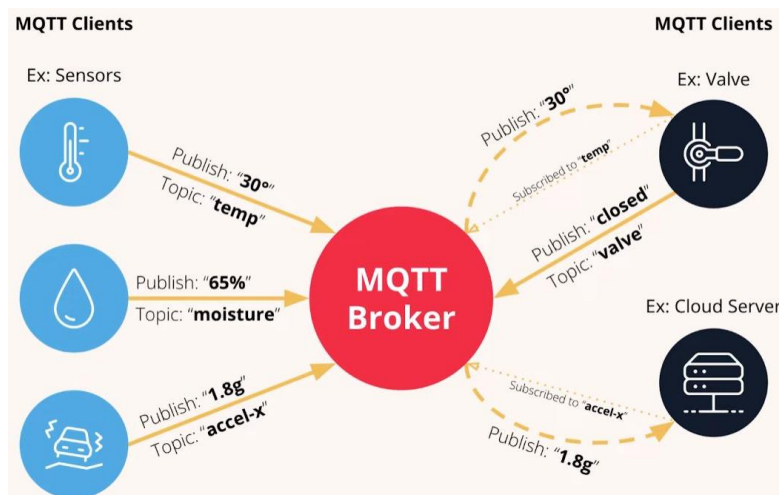


Fig. 3.18: Schema di funzionamento di un broker MQTT (fonte: www.objetconnecte.com)

Una volta definito, nello sketch di Arduino IDE, il topic su cui pubblicare i dati, la scheda può inviare le letture al broker Mosquitto (ad esempio, una lettura a intervalli temporali prestabiliti oppure una pubblicazione del dato a ogni variazione del valore rilevato).

A questo punto i dati inviati dalla scheda vengono pubblicati sul broker Mosquitto, che funge da punto di raccolta e smistamento dei messaggi. Tramite uno script Python eseguito in Visual

Grazie a Visual Studio Code e al linguaggio Python è infatti possibile non solo creare un collegamento tra i dati rilevati dai sensori e la loro visualizzazione all'interno di modelli tridimensionali, ma anche elaborarli ulteriormente in funzione delle specifiche esigenze del progetto, come verrà approfondito nei paragrafi relativi alle implementazioni mediante l'utilizzo dei casi studio (3.2). Questa architettura offre quindi ampie possibilità di personalizzazione, consentendo di adattare l'elaborazione e la rappresentazione dei dati ai diversi obiettivi del progetto.

Ad esempio, importando il modello IFC in Blender mediante l'add-on Bonsai, è possibile associare in modo dinamico il dato proveniente da un sensore a uno specifico IfcSpace, ottenendo così un riscontro immediato sul comfort percepito in un determinato ambiente attraverso il calcolo dell'indice di Fanger e la relativa colorazione degli spazi, accompagnata da indicazioni testuali all'interno del modello, aggiornate continuamente in base alle letture del sensore.

Analogamente, in un contesto HBIM, la stessa logica può essere applicata al monitoraggio dei parametri microclimatici o delle condizioni conservative di edifici storici, consentendo un'analisi continua e mirata dello stato di conservazione.

Di seguito, in Fig. 3.20, è schematizzata l'interazione tra i software utilizzati per la visualizzazione dati IoT mediante metodologie e software open source e freeware. A differenza di quanto osservato nel caso delle soluzioni proprietarie, il sistema risulta maggiormente distribuito tra diversi ecosistemi software (Verde - Arduino, Giallo - protocollo di comunicazione MQTT, Viola - linguaggio di programmazione Python, Blu - modello IFC, Rosso – Blender-Bonsai).

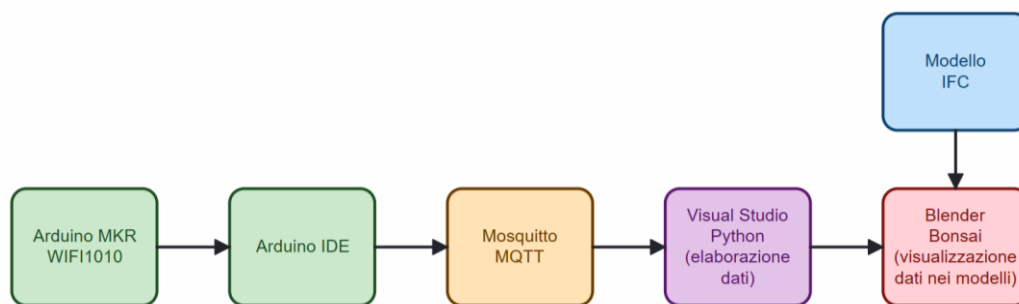


Fig. 3.20: Streaming dei dati mediante software open source

Vantaggi della soluzione open source:

- Flessibilità e personalizzazione: grazie a strumenti come Python e librerie come IfcOpenShell o bpy, è possibile adattare il sistema alle esigenze specifiche del progetto, senza vincoli imposti da software proprietari;
- Costi ridotti: software e librerie open source (come Eclipse Mosquitto, Blender – Bonsai, ecc.) sono gratuiti, rendendo la soluzione accessibile anche a progetti di ricerca o applicazioni di piccola e media scala;
- Trasparenza e interoperabilità: l'utilizzo di standard aperti (IFC, IDS, bSDD, ecc.) e software open source favorisce una maggiore compatibilità con diversi ecosistemi e una più semplice integrazione futura;

- Comunità attiva: gli strumenti open source sono spesso supportati da comunità di sviluppatori ampie e dinamiche che mettono a disposizione documentazione, esempi e aggiornamenti continui.

Criticità:

- Maggiore complessità di implementazione: richiede competenze di programmazione e configurazione eterogenee (ad esempio sviluppo di script Python e gestione delle librerie, configurazioni di Mosquitto e Blender);
- Gestione di grandi quantità di dati: pur essendo adatta a progetti di piccola e media entità, la gestione di volumi molto elevati di dati o di numerosi dispositivi può richiedere infrastrutture aggiuntive;
- Mancanza di supporto ufficiale: in caso di problematiche non è disponibile un servizio clienti dedicato, ed è quindi necessario rivolgersi principalmente al supporto fornito dalle community;
- Maggiore tempo di sviluppo iniziale: la costruzione dell'infrastruttura può richiedere tempistiche maggiori rispetto all'utilizzo di servizi cloud proprietari e già preconfigurati.

3.1.4 Facility Management

Il Facility Management rappresenta l'insieme di attività e processi volti a garantire la piena efficienza, sicurezza e sostenibilità di un edificio lungo tutto il suo ciclo di vita, includendo sia la gestione ordinaria sia la pianificazione di interventi straordinari e di riqualificazione.

Nel contesto della presente ricerca, il Facility Management assume un ruolo centrale in quanto consente di trasformare i dati raccolti dai sistemi di monitoraggio in azioni concrete, a supporto delle decisioni gestionali e degli interventi di conservazione del patrimonio storico.

Al fine di assicurare una gestione ottimale degli edifici sono state individuate tre macro aree principali, approfondite nei paragrafi seguenti:

- Segnalazione guasti, ovvero come la raccolta e la trasmissione in tempo reale dei dati IoT, insieme alle segnalazioni dei manutentori tramite applicazioni dedicate, possano facilitare l'individuazione e la gestione tempestiva di anomalie e guasti;
- Feedback utenti, relativo al coinvolgimento degli occupanti degli ambienti monitorati, che possono fornire segnalazioni e valutazioni attraverso un'interfaccia web dedicata;
- Interventi sul patrimonio storico, riguardanti la pianificazione e il monitoraggio di interventi migliorativi e conservativi specifici per edifici di pregio storico-artistico, nel quadro di una strategia di gestione a lungo termine.

3.1.4.1 Segnalazione guasti

La segnalazione tempestiva di guasti o di altre problematiche legate allo stato di conservazione degli edifici storici riveste un ruolo di primaria importanza ai fini della tutela del patrimonio costruito e dei beni in esso contenuti. In contesti caratterizzati da vincoli conservativi stringenti e dalla presenza di opere sensibili alle variazioni microclimatiche, anche anomalie apparentemente minori possono infatti evolvere rapidamente in criticità rilevanti se non individuate e affrontate in tempi adeguati.

Nel corso della presente ricerca si è cercato di integrare i processi di segnalazione direttamente all'interno del modello informativo, sfruttando le potenzialità offerte dall'interazione tra BIM e sistemi di monitoraggio IoT.

In particolare, mediante Blender, è stato possibile implementare meccanismi di allerta basati sul superamento di soglie predefinite, rendendo immediatamente visibili all'utente eventuali condizioni anomale. Tali alert, visualizzati sotto forma di pop-up testuali, consentono di notificare in tempo reale il superamento di valori limite relativi ai parametri ambientali monitorati, favorendo una risposta rapida da parte dei soggetti coinvolti nella gestione dell'edificio.

A supporto di queste funzionalità, il sistema prevede il coinvolgimento diretto dei manutentori attraverso l'utilizzo di strumenti semplici e ampiamente diffusi, come ad esempio Google Forms (Fig. 3.21). Mediante tali strumenti è possibile aprire ticket di manutenzione associati a specifici ambienti o elementi del modello IFC, descrivendo la natura del problema riscontrato e, se necessario, assegnando un livello di priorità all'intervento. Le segnalazioni così raccolte vengono archiviate automaticamente in fogli di calcolo condivisi o in database strutturati costituendo una base informativa per le successive fasi di gestione.

The image shows a Google Form for reporting maintenance issues and its data in a Google Sheet. The form is titled "Segnalazione guasti e manutenzione" and includes the following fields:

- Problema riscontrato ***: Radio buttons for "Impianto di riscaldamento", "Impianto di raffrescamento", "Impianto elettrico" (selected), "Impianto idrico", "Infiltrazioni", "Degrado superfici", and "Altro:".
- Descrizione dettagliata del problema riscontrato ***: Text input with "Faretto LED capriata centrale non funzionante".
- Urgenza / Priorità ***: Radio buttons for "Non prioritario", "1", "2" (selected), "3", "4", "5", and "Prioritario".
- Foto/Documento allegato**: File upload section with "Immagine 2025-..." attached.
- Data ***: Date input with "23/09/2025".
- Locale ***: Dropdown menu with "Sala VI (IfcSpace08)".
- Nome e contatto del segnalante ***: Text input with "Mario Rossi +39.....".

The Google Sheet below shows the data from the form:

Informazioni cronologiche	Data	Locale	Problema riscontrato	Nome e contatto del segnalante	Descrizione dettagliata del problema riscontrato	Foto/Documento allegato	Urgenza / Priorità
23/09/2025 16.20.26	23/09/2025	Sala VI (IfcSpace08)	Impianto elettrico	Mario Rossi +39.....	Faretto LED capriata centrale non funzionante	https://drive.google.com	2

Fig. 3.21: Segnalazione guasti e report nel Facility Management

Il modulo, una volta compilato e inviato dal tecnico che ha individuato la problematica, può essere esportato in formato .csv oppure collegato direttamente, tramite API, a un database strutturato, come SQLite o PostgreSQL. I dati così raccolti possono essere letti e rielaborati tramite script Python che interagiscono con Blender-Bonsai, permettendo di visualizzare le segnalazioni direttamente all'interno del modello IFC.

Lo script associa ciascun ticket allo spazio corrispondente leggendo il file .csv e identificando l'IfcSpace relativo al locale interessato dalla segnalazione. Gli ambienti con ticket aperti possono quindi essere evidenziati nel modello attraverso diverse modalità di rappresentazione, come colorazioni differenziate in funzione della priorità dell'intervento oppure pop-up informativi.

L'intera procedura di segnalazione e visualizzazione delle anomalie è schematizzata in Fig. 3.22:



Fig. 3.22: Workflow di segnalazione guasti e anomalie

3.1.4.2 Feedback utenti

Analogamente a quanto previsto per i manutentori, la medesima procedura può essere applicata anche alla raccolta delle valutazioni degli utenti in merito al comfort percepito all'interno degli ambienti, sia in contesti lavorativi sia nel caso di visitatori di edifici storici adibiti a mostre o musei.

Il contributo degli utenti consente infatti di restituire una valutazione diretta delle condizioni di comfort, mettendo in evidenza eventuali situazioni di disagio che possono manifestarsi anche quando i dati rilevati dalla sensoristica IoT, utilizzati nei metodi di calcolo come il modello di Fanger illustrato in precedenza, rientrano nei parametri di riferimento.

La possibilità di raccogliere segnalazioni da parte di soggetti non direttamente coinvolti nelle attività manutentive consente inoltre di individuare criticità che altrimenti potrebbero risultare difficilmente rilevabili.

Anche in questo caso è possibile ricorrere a specifici Google Forms (Fig. 3.23) accessibili tramite QR code collocati nei rispettivi locali, che consentono agli utenti di lasciare un feedback sulle condizioni ambientali percepite. Tali informazioni possono essere successivamente integrate con quelle di natura più tecnica relative alla manutenzione, illustrate nel paragrafo precedente, al fine di ottenere un quadro complessivo dello stato degli ambienti monitorati.

The image shows a survey form and its report. The form is titled "How R U? (Risposte)" and includes the following questions and responses:

- How are you dressed? ***: Medium (selected)
- Ambient noise**: 4 (selected)
- How is your perception of temperature, now? ***: Fresh (-1)
- Where are you? Room:**: Sala VI (fcsSpace08)
- What would you change?**: The environment is too dark; I cannot see the artwork.

The report is a spreadsheet with the following data:

Form_Responses1	How is your perception of temperature, now? *	How are you dressed? *	Are you stressed or relaxed, now? *	Where are you? Room:	Ambient noise	What would you change?
23/09/2025 21.17.12	Fresh (-1)	Medium		3 Sala VI (fcsSpace08)	4	The environment is too dark; I cannot see the artwork

Fig. 3.23: Survey utenti e report

3.1.4.3 Interventi sul patrimonio storico

La pianificazione di interventi migliorativi e il monitoraggio dei relativi effetti sul patrimonio storico costituiscono una componente rilevante delle attività di Facility Management. Negli edifici vincolati, tali interventi presentano tuttavia significative complessità già nelle fasi di definizione e pianificazione.

Risulta infatti necessario acquisire una conoscenza approfondita del manufatto oggetto di intervento e bilanciare in modo appropriato il grado di invasività delle soluzioni adottate in relazione ai vincoli fisici e storico-artistici presenti.

Si pensi, ad esempio, alla necessità di ricorrere a un isolamento interno nel caso in cui la facciata esterna sia soggetta a vincoli architettonici, oppure alla definizione dei percorsi impiantistici in presenza di apparati decorativi quali pareti affrescate. Interventi di questo tipo richiedono il coinvolgimento di diverse figure professionali, chiamate a operare in modo coordinato e a condividere strumenti e informazioni, al fine di ridurre il rischio di criticità nelle successive fasi esecutive.

In tale contesto, l'impiego coordinato di standard openBIM e di software per la modellazione e la gestione dei dati consente di individuare i vincoli esistenti e di orientare la definizione degli interventi sulle diverse parti ed elementi dell'edificio.

Come visto in precedenza nel paragrafo 3.1.2, nel caso della sensoristica IoT, anche per la definizione degli interventi all'interno dello schema IFC risulta necessario creare specifici dizionari bSDD contenenti le proprietà relative ai singoli interventi.

Possono essere identificate due macro-aree, ciascuna caratterizzata da specifici Property Set: una relativa all'intervenibilità sulle superfici interne e una relativa ai prospetti esterni.

Per quanto riguarda il primo Property Set, la Tab. 3.2 fa riferimento alle proprietà inerenti agli interventi che interessano le superfici interne, indicando ad esempio la profondità massima delle tracce per il passaggio degli impianti, la possibilità o meno di realizzare un isolamento interno o le dimensioni massime delle contropareti.

Nome della proprietà	Descrizione	Unità di misura o valori disponibili
SurfCov_Level	Copertura della superficie - Entità	TOTAL, PARTIAL
Attic_IsAccessible	Accessibilità del solaio (nel caso di sottotetto)	YES, NO
Attic_IsWalkable	Calpestabilità del solaio (nel caso di sottotetto)	YES, NO
AtticFloor_CanBeCovered	Possibilità di coprire l'estradosso del soffitto adiacente al sottotetto	YES, NO
Leaning	Appoggio sulla superficie	YES, NO
Opening_Reduction_Height_SuspCeiling_Length_Max	Riduzione di altezza netta (per porte/finestre) – Mediante controsoffittatura – Massima riduzione consentita	[m]
Opening_Reduction_Height_RaisedFloor_Length_Max	Riduzione di altezza netta (per porte/finestre) – Mediante rialzo della quota pavimento – Massima riduzione consentita	[m]
Opening_Reduction_Width_Side_Length_Max	Riduzione di larghezza netta (per porte/finestre) – Mediante controparete – Massima riduzione consentita	[m]
Perforation_Depth_Max	Foratura – Profondità massima	[m]
Perforation_Diameter_Max	Foratura – Diametro massimo	[m]
Perforation_Position	Foratura – Posizione	[CENTER, PERIMETER, ANY]
Perforation_Length	Foratura – Lunghezza massima lato 1	[m]
Perforation_Width	Foratura – Lunghezza massima lato 2	[m]
Bonding	Incollaggio	YES, NO
CutOut_Depth_Max	Traccia – Profondità massima	[m]
CutOut_Width_Max	Traccia – Larghezza massima	[m]
ThroughHole_Position	Foratura passante – Posizione	[CENTER, PERIMETER, ANY]
ThroughHole_Diameter_Max	Foratura passante – In posizione centrale/trasversale – Diametro massimo	[m]
DemolitionOfLayers_Depth_Max	Demolizione di strati	[m]
Demolition	Demolizione	YES, NO
Infill	Tamponamento (di porte/finestre)	YES, NO
Excavation	Scavo	YES, NO
UseAsADuctSpace_Side_Max	Uso come cavedio (per canne fumarie e altri cavedi) – Lato maggiore	[m]
UseAsADuctSpace_Side_Min	Uso come cavedio (per canne fumarie e altri cavedi) – Lato minore	[m]

Tab. 3.2: Property Set consigliato per esprimere in formato IFC la scheda di intervenibilità per superfici ed elementi interni

Il secondo Property Set riguarda invece l'intervenibilità sui prospetti esterni.

Nome della proprietà	Descrizione	Unità di misura o valori disponibili
SurfCov_Level	Copertura della superficie - Entità	FULL, PARTIAL
Leaning	Appoggio sulla superficie	YES, NO
Opening_Reduction_Height_SuspCeiling_Length_Max	Riduzione di altezza netta (per porte/finestre) – Mediante	[m]

	controsoffittatura – Massima riduzione consentita	
Opening_Reduction_Height_RaisedFloor_Length_Max	Riduzione di altezza netta (per porte/finestre) – Mediante rialzo della quota pavimento – Massima riduzione consentita	[m]
Opening_Reduction_Width_Side_Length_Max	Riduzione di larghezza netta (per porte/finestre) – Mediante controparete – Massima riduzione consentita	[m]
Perforation_AloneBands_Perimeter_Depth_Max	Foratura lungo fasce – In posizione perimetrale – Profondità massima	[m]
Perforation_AloneBands_Perimeter_Diameter_Max	Foratura lungo fasce – In posizione perimetrale – Diametro massimo	[m]
Perforation_AloneBands_Perimeter_Pitch_Min	Foratura lungo fasce – In posizione perimetrale – Passo minimo	[m]
Perforation_AloneBands_Centre_Depth_Max	Foratura lungo fasce – In posizione centrale/trasversale – Profondità massima	[m]
Perforation_AloneBands_Centre_Diameter_Max	Foratura lungo fasce – In posizione centrale/trasversale – Diametro massimo	[m]
Perforation_AloneBands_Centre_Pitch_Min	Foratura lungo fasce – In posizione centrale/trasversale – Passo minimo	[m]
Perforation_AloneBands_AloneExistingDirections_Depth_Max	Foratura lungo fasce – Lungo direttrici esistenti – Profondità massima	[m]
Perforation_AloneBands_AloneExistingDirections_Diameter_Max	Foratura lungo fasce – Lungo direttrici esistenti – Diametro massimo	[m]
Perforation_AloneBands_AloneExistingDirections_Pitch_Min	Foratura lungo fasce – Lungo direttrici esistenti – Passo minimo	[m]
Perforation_Distributed_Diameter_Max	Foratura distribuita – Diametro massimo	[m]
Perforation_Distributed_Diameter_Density	Foratura distribuita – Densità massima	[-/m ²]
Bonding	Incollaggio	YES, NO
CutOut_Depth_Max	Traccia – In posizione centrale/trasversale – Profondità massima	[m]
CutOut_Width_Max	Traccia – In posizione centrale/trasversale – Larghezza massima	[m]
CutOut_Length_Max	Traccia – In posizione centrale/trasversale – Lunghezza massima	[m]
ThroughHole_Perimeter_Diameter_Max	Foratura passante – In posizione perimetrale – Diametro massimo	[m]
ThroughHole_Perimeter_DistanceFromSide_Max	Foratura passante – In posizione perimetrale – Distanza dal lato massima	[m]
ThroughHole_Centre_Diameter_Max	Foratura passante – In posizione centrale/trasversale – Diametro massimo	[m]
ThroughHole_AloneExistingDirections_Diameter_Max	Foratura passante – Lungo direttrici esistenti – Diametro massimo	[m]
DemolitionOfLayers_Depth_Max	Demolizione di strati	[m]
Demolition	Demolizione	YES, NO
Infill	Tamponamento (di porte/finestre)	YES, NO
UseAsADuctSpace_Side_Max	Uso come cavedio (per canne fumarie e altri cavedi) – Lato maggiore	[m]
UseAsADuctSpace_Side_Min	Uso come cavedio (per canne fumarie e altri cavedi) – Lato minore	[m]

Tab. 3.3: Property Set consigliato per esprimere in formato IFC la scheda di intervenibilità per i prospetti

Una volta determinate le proprietà e pubblicati i relativi dizionari bSDD, è stata sviluppata un'architettura informatica finalizzata alla verifica della compatibilità tra gli interventi ipotizzati e i vincoli presenti nell'edificio. A tale scopo è stato creato un foglio Excel denominato "InputData.xlsx", utilizzato come middleware per la verifica delle compatibilità

tra gli interventi proposti e i vincoli presenti nell'edificio. In particolare, la scheda "QUERIES" consente al tecnico incaricato di pianificare l'intervento ipotizzato nella fase di analisi delle problematiche rilevate, di verificarne la fattibilità su tutte le superfici che costituiscono il modello. Ad esempio, nel caso in cui sia necessario realizzare un nuovo condotto di aerazione, in questa scheda vengono inserite le dimensioni previste dell'intervento.

Nello stesso foglio Excel, la scheda "ELEMENTS" (Fig. 3.24) identifica tutti gli elementi che costituiscono il modello dell'edificio. In questa scheda la figura professionale addetta alle manutenzioni inserisce tutti i vincoli presenti, indicando ad esempio se una determinata superficie possa essere forata ed eventualmente in quale posizione (nessuna, perimetrale, centrale, o senza vincoli). In essa sono raccolte le proprietà illustrate nelle Tab. 3.2 e Tab. 3.3, consentendo di avere un quadro completo dei limiti di intervento (dimensioni dei fori, possibilità di rivestire le superfici, ecc.).

Code	Type	ThroughHole_Position	ThroughHole_Diameter_Max	Opening_Reduction_Height_SuspCeiling	Opening_Reduction_Height_RaisedFloor	Opening_Reduction_Width_Side_Length	Perforation_Depth_Max	Perforation_Diameter_Max	Perforation_Position	Perforation_Length	Perforation_Width	SurfCov_Level	CutOut_Perimeter_Depth_Max	CutOut_Perimeter_Width_Max	CutOut_Centre_Depth_Max	CutOut_Centre_Width_Max	Attic_IsAccessible	Attic_IsWalkable
F	Surface:Floor:InnerSide	PERIMETER	0,09				0,05	0,01	PERIMETER	1	0,05	TOTAL	0,1	0,2	0,1	0,2		
N	Surface:Wall:InnerSide	PERIMETER	0,9				0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2		
E	Surface:Ceiling:InnerSide	PERIMETER	0,9				0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2	TRUE	FALSE
S	Surface:Roof:OuterSide	NO	0,9				0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2	TRUE	FALSE
W	Surface:Floor:OuterSide	PERIMETER	0,9				0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2		
R	Surface:Wall:OuterSide	CENTER	0,9				0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2		
Door01	Surface:Ceiling:OuterSide	ANY	0,9				0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2	TRUE	FALSE
	Door/Window			0	0	0												
	Shaft	PERIMETER	0,9	0	0	0	0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2		
	Surface:Floor:InnerSide	PERIMETER	0,9				0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2		
	Surface:Floor:InnerSide	PERIMETER	0,9				0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2		
	Surface:Floor:InnerSide	PERIMETER	0,9				0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2		
	Surface:Floor:InnerSide	PERIMETER	0,9				0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2		
	Surface:Floor:InnerSide	PERIMETER	0,9				0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2		
	Surface:Floor:InnerSide	PERIMETER	0,9				0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2		
	Surface:Floor:InnerSide	PERIMETER	0,9				0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2		
	Surface:Floor:InnerSide	PERIMETER	0,9				0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2		
	Surface:Floor:InnerSide	PERIMETER	0,9				0,1	0	PERIMETER	0,1	0,2	PARTIAL	0,1	0,2	0,1	0,2		

Fig. 3.24: Middleware FM – Vincoli degli interventi

La scheda "CONSTRAINTS" (Fig. 3.25) descrive invece i vincoli associati alle singole lavorazioni necessarie per la realizzazione degli interventi. Se nella scheda precedente viene indicata, ad esempio, la possibilità o meno di posare una controparete isolata su una superficie, in questa sezione vengono specificate nel dettaglio le operazioni necessarie per eseguire tale intervento, indipendentemente quindi dal manufatto sul quale si sta effettuando l'analisi. Nel caso della controparete, ad esempio, sono indicate le caratteristiche delle lavorazioni richieste, come la foratura della muratura di massimo 4 cm di profondità e un diametro massimo di 1 cm per il fissaggio del telaio di supporto ai pannelli, nonché la successiva posa dello strato isolante).

Parameter	Scavo	Demolizione	Demolizione di atrati	Posa - In controsoffittatura	Posa - In controparete	Isolamento - Lato interno - Su soffitto	Isolamento - Lato interno - Su parete	Isolamento - A cappotto	Posa - In traccia - Tubi	Posa - In traccia - Cavi	Posa - Aggancio - Tubi	Posa - Aggancio - Cavi	Posa - Aggancio - Condotti	Installazione di terminali d'impianto	Passaggio con foro - Tubi	Passaggio con foro - Cavi	Passaggio con foro - Condotti
Invasivity	1	2	3	4	4	4	4	4	5	5	6	6	6	6	7	7	7
ThroughHole_Position															>0	>0	>0
ThroughHole_Diameter_Max															>=in1 + 0.03	>=in1 + 0.01	>=max(in2,in3) + 0.02
Opening_Reduction_Height_SuspCeiling_Length_Max																	
Opening_Reduction_Height_RaisedFloor_Length_Max																	
Opening_Reduction_Width_Side_Length_Max																	
Perforation_Depth_Max				>=0.04	>=0.02	>=0.04	>=0.02	>=0.08			>=0.04	>=0.02	>=0.04	>=0.04			
Perforation_Diameter_Max				>=0.01	>=0.01	>=0.01	>=0.01	>=0.04			>=0.01	>=0.004	>=0.01	>=0.01			
Perforation_Position				=3	=3	=3	=3	=3			<=3	<=3	<=3	=1			
Perforation_Length											>=in4	>=in4	>=in4	=2			
Perforation_Width											>=0.15	>=0.01	>=0.4	=1			
SurfCov_Level				=2	=2	=2	=2	=2			<=2	<=2	<=2	=1			
CutOut_Perimeter_Depth_Max									>=in1 + 0.03	>=in1 + 0.01							
CutOut_Perimeter_Width_Max									>=in1 + 0.03	>=in1 + 0.01							
CutOut_Centre_Depth_Max									>=in1 + 0.03	>=in1 + 0.01							
CutOut_Centre_Width_Max									>=in1 + 0.03	>=in1 + 0.01							
Attic_IsAccessible																	
Attic_IsWalkable																	
AtticFloor_CanBeCovered																	

Fig. 3.25: Middleware FM – Vincoli delle lavorazioni

Questo sistema consente di ottenere un controllo incrociato tra le esigenze dell'intervento, (ad esempio la realizzazione di un condotto di aerazione di dimensioni pari a 20 × 30 cm, definita nella scheda "QUERIES"), i requisiti operativi necessari alla sua esecuzione, come la necessità di un foro con adeguate tolleranze (scheda "CONSTRAINTS"), e i vincoli dell'edificio, definiti dal tecnico operante in accordo con la soprintendenza competente (scheda "ELEMENTS").

A partire da queste informazioni, uno script Python dedicato legge la richiesta definita nella scheda "QUERIES" e, per ciascun elemento del modello, verifica la tipologia di lavorazione ammessa. Le lavorazioni sono classificate secondo un grado di invasività, dalla più invasiva (ad esempio scavo o demolizione) alla meno invasiva (ad esempio tamponamenti o isolamenti). A ciascuna tipologia di intervento è associato un codice numerico e un colore identificativo.

Lo script confronta i requisiti dell'intervento richiesto con i vincoli definiti e verifica se le condizioni risultano soddisfatte fino a una determinata soglia di invasività. Ad esempio, la posa in traccia di tubazioni, identificata con un codice numerico di invasività pari a 5, viene rappresentata nel modello BIM mediante la colorazione della superficie interessata in base al codice assegnato. Ciò rende immediatamente leggibile che, qualora sia ammessa una lavorazione con codice 5, risultano ammissibili anche tutte le lavorazioni con codice maggiore (dal 6 a seguire), corrispondenti a interventi progressivamente meno invasivi.

Nel caso in cui lo script verifichi che nessuna delle lavorazioni definite nella scheda "CONSTRAINTS" risulti ammessa, l'elemento viene colorato in modo da rendere immediatamente percepibile l'impossibilità di eseguire interventi sulla parete, situazione tipica qualora vi sia la presenza di affreschi o di altri elementi di pregio storico-artistico all'interno dell'edificio.

L'automazione di queste verifiche è resa possibile tramite Dynamo, che consente di leggere sia le proprietà inserite nel modello BIM per i diversi elementi che lo compongono, sia i valori contenuti nelle tabelle Excel in relazione alle misure delle lavorazioni da verificare. Dynamo permette inoltre di ottenere una resa visiva immediata dei vincoli direttamente sulle superfici del modello (Fig. 3.26).

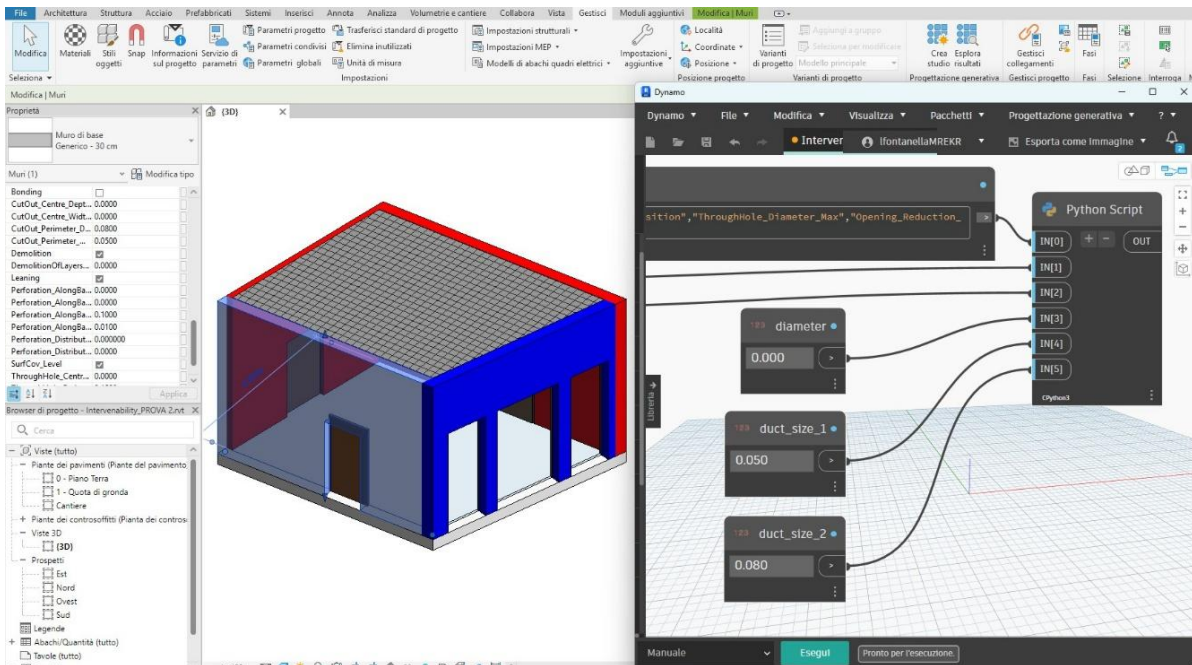


Fig. 3.26: Revit - Dynamo per la definizione dei vincoli sugli interventi di manutenzione

Ottimizzare la gestione di queste informazioni direttamente nel modello informativo consente di rendere esplicite le operazioni consentite sulle diverse superfici dell'edificio, tenendo conto dei vincoli presenti e delle possibili interferenze. Grazie a una rappresentazione visiva immediata, anche gli operatori coinvolti nelle attività esecutive dispongono di indicazioni chiare e univoche sugli interventi ammissibili e sulle aree in cui possono essere realizzati, migliorando il coordinamento tra progetto, conservazione ed esecuzione.

3.2 Implementazione nei casi studio

Nei paragrafi seguenti viene illustrata l'applicazione operativa ai casi studio analizzati delle tecnologie e delle procedure descritte nei capitoli precedenti.

3.2.1 Analisi termiche

Per quanto riguarda le valutazioni di carattere termico ed energetico, nelle prime fasi della ricerca sono stati utilizzati strumenti proprietari, nello specifico Autodesk Revit e l'ambiente di programmazione visuale Dynamo integrato al suo interno, al fine di determinare e verificare il rispetto dei limiti di trasmittanza degli elementi opachi in funzione della zona climatica di appartenenza, come previsto dal D.M. 26 giugno 2015 (Decreto "Requisiti Minimi").

È stato quindi realizzato il modello BIM dell'edificio preso in esame (Fig. 3.27), successivamente popolato con le informazioni necessarie allo svolgimento delle verifiche energetiche, tra cui:

- la zona climatica, indicata tramite una specifica proprietà condivisa (ClimateZone) importata nel progetto;
- la classificazione di tutti gli elementi opachi dell'involucro (murature, copertura, solai, ecc.) e la definizione delle relative stratigrafie, comprensive dei valori di conducibilità termica, spessore e resistenza termica dei singoli strati;
- l'individuazione dei locali riscaldati e non riscaldati, informazione necessaria per la corretta determinazione delle superfici disperdenti oggetto di verifica.

Questi dati risultano fondamentali per individuare quali elementi opachi debbano essere sottoposti al controllo dei limiti di trasmittanza, ovvero quelli che separano ambienti riscaldati da ambienti non riscaldati o dall'esterno. La corretta definizione delle stratigrafie e la classificazione dei singoli componenti consentono infatti il calcolo dei valori di trasmittanza e la loro immediata individuazione all'interno del modello informativo.

Nel contesto del presente lavoro questa fase assume un ruolo preliminare ma strategico, poiché fornisce i parametri di riferimento necessari per il confronto con i dati successivamente rilevati tramite sensoristica IoT e per la valutazione dell'efficacia delle strategie di gestione e miglioramento adottate nei casi studio analizzati.

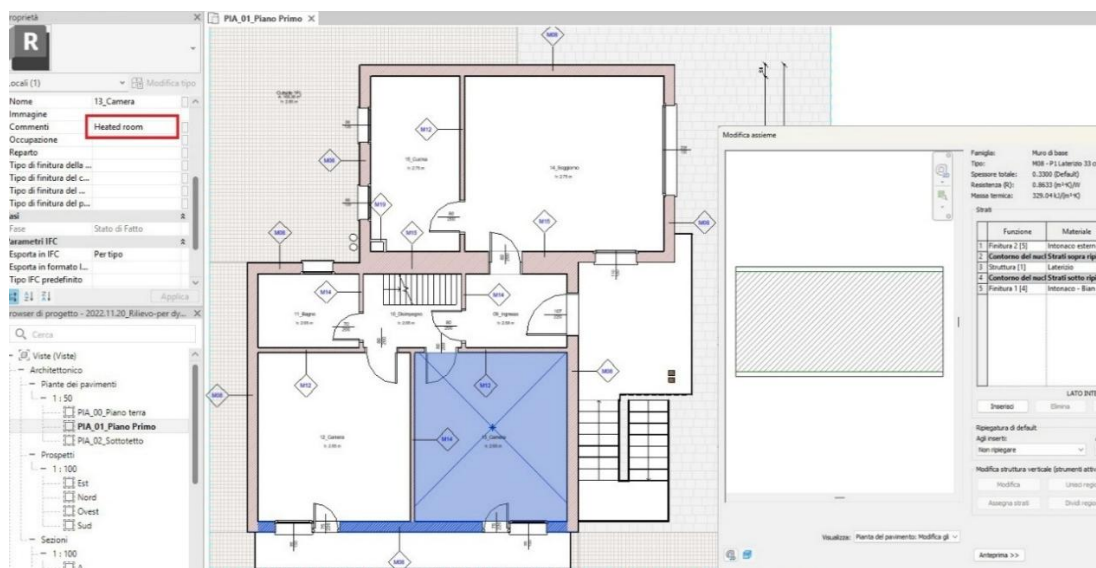


Fig. 3.27: Modellazione BIM per analisi energetiche

Per l'elaborazione dei dati relativi agli aspetti termici inseriti nel modello BIM, ci si è avvalsi dell'ambiente di programmazione visuale Dynamo (Fig. 3.28).

Attraverso una serie di nodi opportunamente configurati è stato possibile selezionare e filtrare gli elementi dell'involucro edilizio, interrogandone le stratigrafie al fine di calcolare i valori di trasmittanza termica. In particolare, uno specifico nodo personalizzato basato su script Python ha consentito di selezionare esclusivamente gli elementi soggetti a verifica. Inoltre, un file JSON contenente tutti i limiti previsti dalla normativa in funzione della tipologia di componente e della zona climatica è stato utilizzato come riferimento per la verifica del rispetto o meno dei requisiti di legge.

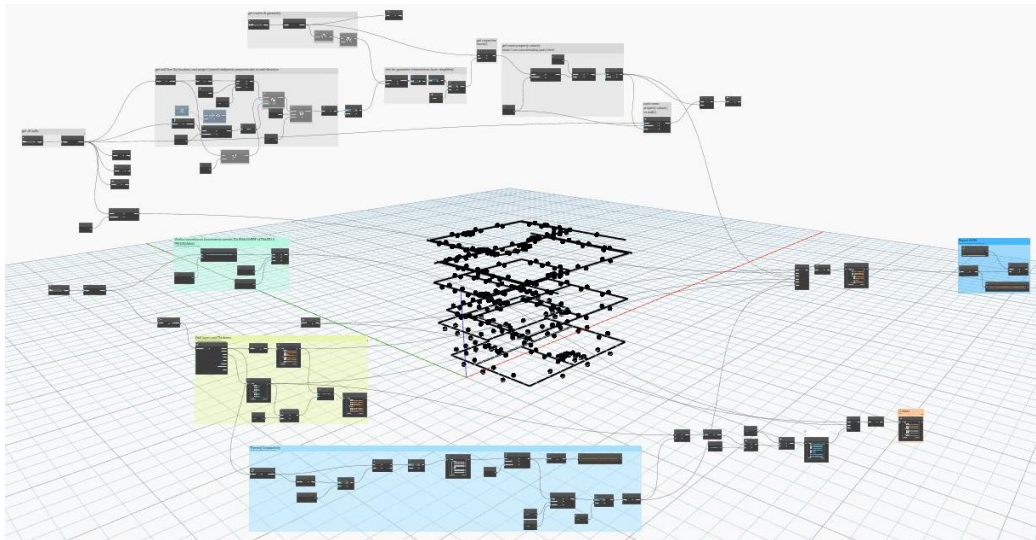


Fig. 3.28: Programmazione a blocchi in ambiente Dynamo

Grazie a Dynamo è inoltre possibile evidenziare direttamente nel modello quali murature non soddisfano i requisiti minimi (Fig. 3.29), rendendo la verifica intuitiva e immediata. La gradazione dei colori può variare in funzione dell'entità del superamento dei limiti, in modo da evidenziare con maggiore chiarezza le priorità degli interventi migliorativi.

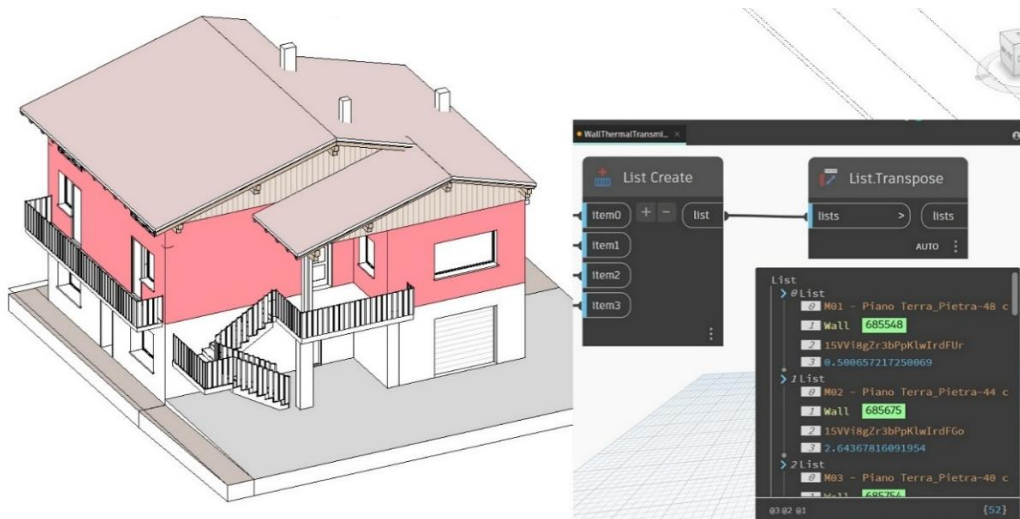


Fig. 3.29: Verifica del superamento dei limiti di trasmittanza degli elementi opachi

L'approccio descritto mediante Revit e Dynamo rappresenta una soluzione efficace in ambiente proprietario. Tuttavia, al fine di garantire maggiore interoperabilità e indipendenza dalle piattaforme software, la medesima procedura è stata successivamente implementata mediante standard openBIM e strumenti open source. In questo caso il primo standard utilizzato è l'IDS (Information Delivery Specification), impiegato per definire i requisiti informativi che il file IFC deve avere per poter essere utilizzato.

Il file IDS è un formato XML che può essere creato manualmente utilizzando un editor di testo, come Visual Studio Code, oppure anche tramite strumenti più semplici. In alternativa è possibile utilizzare strumenti gratuiti come usBIM.IDSeditor (Fig. 3.30), sviluppato da ACCA Software, che consente di realizzare i contenuti dell'IDS in modo guidato e intuitivo. Tramite

questo strumento è inoltre possibile generare automaticamente report riassuntivi esportabili, facilitando la documentazione e la condivisione delle specifiche del modello.

The screenshot shows the usBIM.IDSeditor interface. On the left, there's a sidebar with 'Specifiche' selected. The main area displays a table of requirements:

Nome	Descrizione
1 Types Of Building	Gli edifici sono classificati, in base alla loro destinazione d'uso, nelle categorie di cui all'articolo 3 del D.P.R. 412/93 - E.1 Edifici adibiti a residenza e assimilabili - E.2 Edifici adibiti a uffici e assimilabili - E.3 Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili - E.4 Edifici adibiti ad attività ricreative, associative o di culto e assimilabili - E.5 Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili - E.6 Edifici adibiti ad attività sportive - E.7 Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili - E.8 Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili.
2 Types Of Intervention	I tipi di interventi previsti (D.M. 26 giugno 2015 - Decreto requisiti minimi) sono: - Nuova costruzione - Demolizione e ricostruzione - Ampliamento e sopraelevazione - Ristrutturazione importante di I livello - Ristrutturazione importante di II livello - Riqualificazione energetica
3 Geolocalization	Orientare correttamente l'edificio rispetto al Nord reale è necessario per ottenere analisi corrette riguardo il percorso del sole e degli ombreggiamenti. Verificare che l'IFC esportato mantenga l'orientamento del nord reale e non quello di progetto.
4 Climate Zone	Il DPR 412/93 stabilisce destinazioni d'uso degli immobili e suddivide il territorio italiano in sei zone climatiche, dalla A alla F, in base al criterio dei Gradi Giorno. Criteri questi, fondamentali per la progettazione degli impianti di climatizzazione e la definizione del periodo di accensione e durata. Il "Grado Giorno" di una località, è la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente, convenzionalmente fissata a 20°C, e la temperatura media esterna giornaliera. - Zona A: comuni con gradi giorno inferiori a 600 - Zona B: comuni con gradi giorno tra 600 e 900 - Zona C: comuni con gradi giorno tra 900 e 1.400 - Zona D: comuni con gradi giorno tra 1.400 e 2.100 - Zona E: comuni con gradi giorno tra 2.100 e 3.000 - Zona F: comuni con gradi giorno superiori a 3.000
5 Shading	La modellazione del contesto, comprensiva di tutti gli oggetti che causano ombreggiamenti all'edificio di riferimento, è necessaria per una corretta diagnosi energetica.

On the right, an XML snippet is visible, showing the structure of the requirements in the IFC file.

Fig. 3.30: IDS per i requisiti minimi degli edifici mediante usBIM.IDSeditor e relativo file XML

Nel caso in esame, l'IDS verifica che il file IFC, realizzato ed esportato da un qualsiasi software di modellazione BIM, contenga informazioni relative alla geolocalizzazione dell'edificio, all'identificazione dei locali riscaldati e non riscaldati e alla corretta classificazione degli elementi con le relative stratigrafie.

Per verificare i requisiti contenuti nel file IDS è stato utilizzato il software open source Blender, che consente di importare e visualizzare il modello IFC mediante il modulo Bonsai. Tramite Bonsai è possibile importare il file IDS per eseguire il controllo delle specifiche; il risultato dell'analisi può essere riportato in una pagina HTML, nella quale vengono indicati nel dettaglio gli elementi che hanno superato la verifica e quelli che non soddisfano i requisiti (Fig. 3.31).

The screenshot shows a summary report for 'Progetto1-Requisiti_Informativi_An.En V02 ifc' dated 2024-04-18 10:05:52. The report is titled 'Summary' and shows a 100% pass status. The details are as follows:

- Pass:** Specifications passed: 18 / 18 | Requirements passed: 58 / 58 | Checks passed: 105 / 105
- Types Of Building:**
 - Descrizione: Gli edifici sono classificati, in base alla loro destinazione d'uso, nelle categorie di cui all'articolo 3 del D.P.R. 412/93 - E.1 Edifici adibiti a residenza e assimilabili - E.2 Edifici adibiti a uffici e assimilabili - E.3 Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili - E.4 Edifici adibiti ad attività ricreative, associative o di culto e assimilabili - E.5 Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili - E.6 Edifici adibiti ad attività sportive - E.7 Edifici adibiti ad attività scolastiche e assimilabili - E.8 Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili.
 - Insistere il parametro condiviso "TypesOfBuilding" nella sezione "Informazioni sul Progetto" - Dati. Indicare il tipo di edificio tra quelli previsti.
 - Pass: Checks passed: 0 / 0 | Elements passed: 2 / 2
 - Applicability:
 - Elementi with TypesOfBuilding data of ["enumeration": ["E.1 Edifici adibiti a residenza e assimilabili", "E.2 Edifici adibiti a uffici e assimilabili", "E.3 Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili", "E.4 Edifici adibiti ad attività ricreative, associative o di culto e assimilabili", "E.5 Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili", "E.6 Edifici adibiti ad attività sportive", "E.7 Edifici adibiti ad attività scolastiche e assimilabili", "E.8 Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili"]] in the dataset Data
- Requirements:**
- Types Of Intervention:**
 - Descrizione: I tipi di interventi previsti (D.M. 26 giugno 2015 - Decreto requisiti minimi) sono: - Nuova costruzione - Demolizione e ricostruzione - Ampliamento e sopraelevazione - Ristrutturazione importante di I livello - Ristrutturazione importante di II livello - Riqualificazione energetica
 - Insistere il parametro condiviso "TypesOfIntervention" nella sezione "Informazioni sul Progetto" - Dati
 - Pass: Checks passed: 0 / 0 | Elements passed: 2 / 2

Fig. 3.31: Verifica requisiti informativi

Una volta validato il file IFC, questo può essere elaborato tramite la libreria Python `IfcOpenShell`. In particolare, è possibile operare sulle entità `IfcRelSpaceBoundary` per individuare i delimitatori fisici o virtuali degli spazi. Gli spazi stessi sono definiti come `IfcSpace` e, grazie a una proprietà impostata dall'utente (`IfcPropertySingleValue` "Heated room" con valore booleano `True` o `False`, Fig. 3.32), è possibile distinguere se siano riscaldati o meno.

Il codice Python filtra quindi tutti gli elementi che separano uno spazio riscaldato da uno non riscaldato, ovvero quelli effettivamente soggetti a verifica. Per ciascuno di essi viene calcolata la trasmittanza termica (U-value, espressa in W/m^2K): a tal fine il codice legge le singole stratigrafie, con i relativi materiali, e determina il valore complessivo di trasmittanza. Il risultato è un elenco di elementi corredato dal rispettivo U-value, che deve essere confrontato con i limiti prescritti dalla normativa.

Per stabilire il valore limite corretto è necessario identificare preliminarmente il tipo di intervento (ad esempio nuova costruzione, ampliamento, ristrutturazione, ecc.), poiché, come descritto nel paragrafo 2.2.4, i limiti di legge variano in funzione della tipologia. Questa informazione viene letta direttamente nel file IFC da `IfcOpenShell`, avendo previsto nel file IDS la presenza obbligatoria di tale dato come requisito di validazione.

Successivamente, la libreria Python `geopy.geocoders` consente di ricavare il Comune in cui si trova l'edificio a partire dalle coordinate geografiche presenti nel file IFC. Un file XML esterno, contenente l'elenco completo dei Comuni italiani con le rispettive zone climatiche, viene quindi interrogato dal codice; un ulteriore file JSON, nel quale la normativa vigente è stata tradotta in forma tabellare (Fig. 3.33), fornisce infine il limite di trasmittanza di riferimento per ciascun elemento oggetto di verifica.

```
#46514=IFCRELDEFINESBYPROPERTIES ('3q4XqVh$vkWamAZhkRcFmU', #18, $, $, (#160), #289);  
  
#160=IFCSPACE ('3Fgte75Yr420jXHwsIe3wr', #18, '11', $, $, #147, #159, '15_Cucina', .ELEMENT., .NOTDEFINED., $);  
  
#289=IFCPROPERTYSET ('2qIsDCQ502kfSd5_mJeYSF', #18, 'RequisitiMinimiEdifici', $, (#254, #255, #256));  
  
#254=IFCPROPERTYSINGLEVALUE ('Categoria', $, IFCLABEL ('Locali'), $);  
#255=IFCPROPERTYSINGLEVALUE ('Heated room', $, IFCBOOLEAN (.T.), $);
```

Fig. 3.32: Schema `IfcSpace` – Heated Room

Nel complesso, lo script è composto dall'integrazione di diverse porzioni di codice che consentono di:

- Identificare tutti gli elementi presenti nel modello IFC (muri, pavimenti, serramenti, ecc.);
- Identificare tutti i locali e leggerne il valore "HeatedRoom" (True o False) per determinare quali ambienti siano riscaldati;
- Determinare quali elementi siano soggetti a verifica della trasmittanza;
- Leggere il tipo di intervento (nuova costruzione, ristrutturazione, ecc.) tra le proprietà presenti nel file IFC e vincolanti al fine della sua validazione tramite IDS;
- Leggere le coordinate geografiche per determinare il Comune in cui è collocato l'intervento e, mediante un file XML contenente l'elenco di tutti i Comuni del territorio italiano, identificarne la zona climatica;
- Effettuare la verifica del rispetto della trasmittanza.

```

1  {
2  "TypeOfOperation": {
3  "NewBuilding": {
4  "BuildingEnvelope": {
5  "UValues - Admitted": {
6  "Climate Zone A": {"Wall": 0.43,"Roof": 0.35,"Floor": 0.44,"Window": 3},
7  "Climate Zone B": {"Wall": 0.43,"Roof": 0.35,"Floor": 0.44,"Window": 3},
8  "Climate Zone C": {"Wall": 0.34,"Roof": 0.33,"Floor": 0.38,"Window": 2.2},
9  "Climate Zone D": {"Wall": 0.29,"Roof": 0.26,"Floor": 0.29,"Window": 1.8},
10 "Climate Zone E": {"Wall": 0.26,"Roof": 0.22,"Floor": 0.26,"Window": 1.4},
11 "Climate Zone F": {"Wall": 0.24,"Roof": 0.20,"Floor": 0.24,"Window": 1.1}
12 }
13 },
14 "Hvac": {
15 "boiler": {"minimunEff": 0.85}
16 },
17 },
18 "BuildingEnlargement": {
19 "BuildingEnvelope": {
20 "UValues - Admitted": {
21 "Climate Zone A": {"Wall": 0.43,"Roof": 0.35,"Floor": 0.44,"Window": 3},
22 "Climate Zone B": {"Wall": 0.43,"Roof": 0.35,"Floor": 0.44,"Window": 3},
23 "Climate Zone C": {"Wall": 0.34,"Roof": 0.33,"Floor": 0.38,"Window": 2.2},
24 "Climate Zone D": {"Wall": 0.29,"Roof": 0.26,"Floor": 0.29,"Window": 1.8},
25 "Climate Zone E": {"Wall": 0.26,"Roof": 0.22,"Floor": 0.26,"Window": 1.4},
26 "Climate Zone F": {"Wall": 0.24,"Roof": 0.20,"Floor": 0.24,"Window": 1.1}
27 }
28 },
29 },
30 },
31 "BuildingRenovation": {
32 "BuildingEnvelope": {

```

Fig. 3.33: Limiti trasmittanze per nuovi edifici e ampliamenti

Il risultato, come mostrato in Fig. 3.34, non si limita a fornire informazioni riguardo agli esiti della verifica, ma suggerisce anche possibili interventi migliorativi nel caso in cui i requisiti non siano soddisfatti, indicando gli spessori di isolante da utilizzare per rientrare nei valori accettati (ipotizzando l'utilizzo di un isolante standard con conducibilità termica pari a 0.040 W/mK).

```

27 def CHECK>IfCAM(self):
28     UValue = round((1 / (self.Calc_ThResistance() + 0.04 + 0.13)),2)
29     UValue_Maximum = self.cam['TypeOfOperation'][self.Operation_Type][self.Operation_Type_Sub]['UValues - Admitted'][self.Climate_Zone]

```

```

PROBLEMI  OUTPUT  CONSOLE DI DEBUG  TERMINALE  PORTE

PS C:\Users\Luca> & D:\Users\Luca\AppData\Local\Programs\Python\Python311\python.exe d:/Università/02_Dottorato/10_bSDD_DynamoPY_ReqMinimi_CAM/
M01 - Piano Terra_Pietra-48 cm - UValue = 0.5 W/m²K - Check is False (reference value: 0.24 ) --> You are asked to add about 0.087 m of insulat
M02 - Piano Terra_Pietra-44 cm - UValue = 2.64 W/m²K - Check is False (reference value: 0.24 ) --> You are asked to add about 0.152 m of insu
M03 - Piano Terra_Pietra-40 cm - UValue = 2.77 W/m²K - Check is False (reference value: 0.24 ) --> You are asked to add about 0.152 m of insu
M04 - Piano Terra_CA - 47cm - UValue = 2.56 W/m²K - Check is False (reference value: 0.24 ) --> You are asked to add about 0.151 m of insulat
M08 - P1 Laterizio 30 cm - UValue = 1.05 W/m²K - Check is False (reference value: 0.24 ) --> You are asked to add about 0.129 m of insulation
M08 - P1 Laterizio 30 cm - UValue = 1.05 W/m²K - Check is False (reference value: 0.24 ) --> You are asked to add about 0.129 m of insulation
M08 - P1 Laterizio 30 cm - UValue = 1.05 W/m²K - Check is False (reference value: 0.24 ) --> You are asked to add about 0.129 m of insulation
M08 - P1 Laterizio 30 cm - UValue = 1.05 W/m²K - Check is False (reference value: 0.24 ) --> You are asked to add about 0.129 m of insulation
M08 - P1 Laterizio 30 cm - UValue = 1.05 W/m²K - Check is False (reference value: 0.24 ) --> You are asked to add about 0.129 m of insulation
M08 - P1 Laterizio 30 cm - UValue = 1.05 W/m²K - Check is False (reference value: 0.24 ) --> You are asked to add about 0.129 m of insulation
M08 - P1 Laterizio 30 cm - UValue = 1.05 W/m²K - Check is False (reference value: 0.24 ) --> You are asked to add about 0.129 m of insulation
M08 - P1 Laterizio 30 cm - UValue = 1.05 W/m²K - Check is False (reference value: 0.24 ) --> You are asked to add about 0.129 m of insulation
M07_Piano Terra divisorio Pietra_CA - 90 cm - UValue = 1.52 W/m²K - Check is False (reference value: 0.24 ) --> You are asked to add about 0.
M08 - P1 Laterizio 30 cm - UValue = 1.05 W/m²K - Check is False (reference value: 0.24 ) --> You are asked to add about 0.129 m of insulation
PS C:\Users\Luca>

```

Fig. 3.34: Verifica delle trasmittanze mediante IfcOpenShell

Sia la parte relativa ai software proprietari utilizzati (file Dynamo in ambiente Revit) sia le corrispettive implementazioni sviluppate in ottica openBIM (script Python e file IDS) sono state pubblicate nella pagina GitHub della ricerca contenente i workflow proprietari e openBIM per i calcoli delle trasmittanze termiche [181] e risultano liberamente accessibili. Il repository include non solo i codici sorgente, ma anche la documentazione di supporto, le procedure operative adottate e gli schemi di configurazione necessari alla corretta riproduzione del flusso di lavoro proposto nella presente ricerca.

Questa scelta è stata adottata con l'obiettivo di favorire la trasparenza del metodo proposto, facilitarne la replicabilità in contesti differenti e supportare ulteriori sviluppi e adattamenti nell'ambito della ricerca scientifica e della pratica professionale.

Tale impostazione risulta particolarmente efficace nel caso di interventi di restauro e riqualificazione del patrimonio costruito, dove ogni edificio presenta caratteristiche specifiche e richiede soluzioni personalizzate compatibili con i vincoli storici e architettonici. La disponibilità di strumenti aperti e adattabili consente infatti di applicare il metodo proposto in funzione delle specificità del singolo edificio esaminato, mantenendo al contempo un approccio strutturato e verificabile anche in termini di efficienza energetica e gestione operativa.

Il modello BIM, arricchito con dati climatici, tipologici e prestazionali, diventa così una piattaforma conoscitiva unificata capace di supportare decisioni progettuali consapevoli, simulazioni energetiche e monitoraggi post-intervento.

La procedura open source descritta nel presente paragrafo dimostra quindi la fattibilità e le potenzialità dell'approccio proposto, evidenziando come l'integrazione tra standard openBIM, strumenti di programmazione e modelli informativi possa supportare in modo efficace le analisi termiche degli edifici.

In prospettiva futura, potranno essere sviluppati ulteriori miglioramenti, come la creazione di specifiche API per rendere più intuitivo per l'utente l'inserimento dei dati utili alla determinazione dei limiti di legge, nonché l'implementazione della rappresentazione grafica dei risultati tramite la colorazione degli elementi che presentano delle criticità, analogamente a quanto visto precedentemente in ambiente Revit, ma utilizzando software open source e freeware come Blender-Bonsai.

3.2.2 Streaming dati IoT

Per comprendere il funzionamento della visualizzazione dello stream di dati, nelle sezioni seguenti vengono illustrate le procedure operative sviluppate nel corso della ricerca. In particolare, sono descritte le modalità di collegamento tra i sensori, le piattaforme software (sia proprietarie che open source) e i modelli IFC, con particolare attenzione alla visualizzazione dei dati in tempo reale e al loro utilizzo a supporto delle analisi termiche e delle attività di Facility Management.

La metodologia adottata prevede la possibilità di lavorare sia con dati acquisiti in tempo reale tramite sensori ambientali, sia con dati storici provenienti da database già strutturati. Questo consente di effettuare analisi non soltanto puntuali, ma anche orientate alla valutazione dell'andamento delle prestazioni dell'edificio nel medio e lungo periodo.

In una prima fase, l'attenzione è stata posta sulle modalità di trasmissione dei dati in tempo reale, o comunque con una latenza ridotta rispetto al momento della misurazione, tenendo conto del fisiologico ritardo tra acquisizione e invio dell'informazione. A tale scopo, come descritto nel paragrafo 1.3.7.1, è stato utilizzato un microcontrollore Arduino MKR WiFi 1010 configurato con il sensore di temperatura e umidità DHT22, come riportato nello schema di Fig. 3.11.

Il sensore è stato collocato in uno dei locali degli edifici utilizzati come caso studio e, dopo aver configurato Arduino IDE affinché inviasse una lettura ogni due minuti, è stata avviata la trasmissione dei dati di temperatura e umidità. I valori acquisiti sono stati visualizzati

mediante un PC connesso a una rete Wi-Fi e collocato in un edificio differente da quello oggetto di misurazione. Questo passaggio ha consentito di verificare l'affidabilità della comunicazione tra sensori e piattaforme esterne.

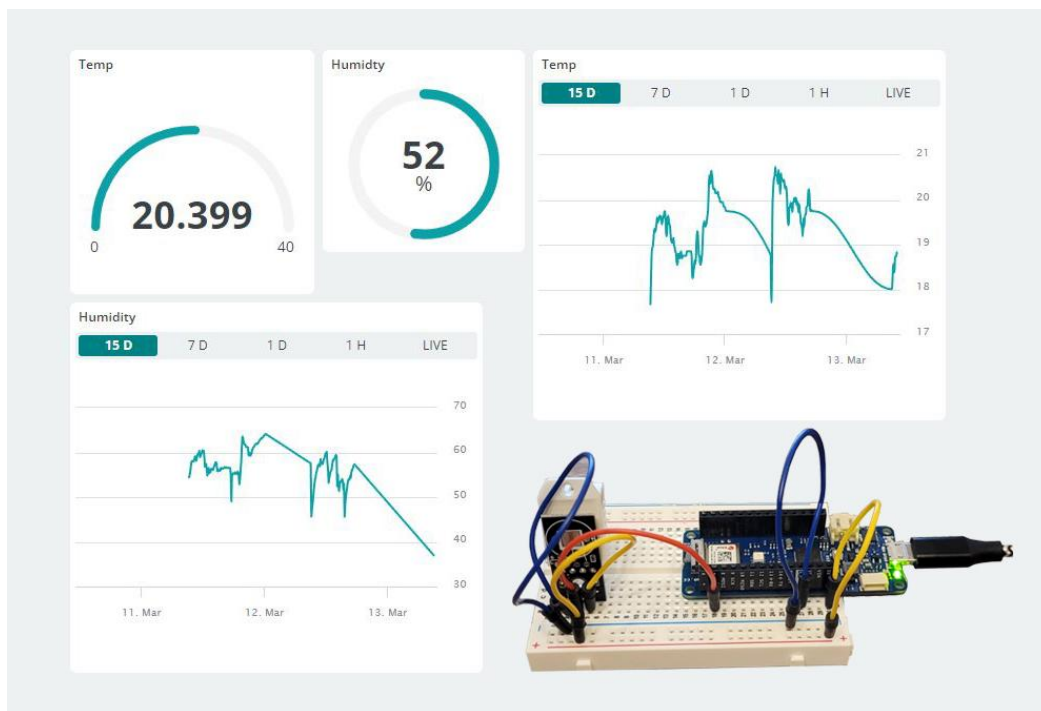


Fig. 3.35: Lettura dei dati mediante Arduino Cloud

Una volta verificata l'affidabilità delle operazioni di raccolta e invio dei dati, nonché la possibilità di trasmetterli indipendentemente dalla posizione dei sensori purché situati all'interno del raggio di copertura della rete Wi-Fi utilizzata, l'attenzione si è spostata sulla visualizzazione di tali informazioni all'interno dei modelli IFC. Come descritto nei paragrafi 3.1.3.1 e 3.1.3.2, in una prima fase sono stati utilizzati software proprietari, per poi orientarsi successivamente verso soluzioni open source.

Tramite Arduino IDE il segnale acquisito dal sensore è stato quindi trasmesso a Microsoft Azure, opportunamente configurato come piattaforma di raccolta e gestione dei dati, e successivamente a Microsoft Power BI per la loro visualizzazione mediante dashboard bidimensionali (Fig. 3.36). A differenza di Arduino Cloud, Power BI si configura come una piattaforma completa di business intelligence che non si limita alla visualizzazione dei dati, ma consente anche di analizzarli, aggregarli e confrontarli con altre fonti, quali database storici, fogli di calcolo o servizi cloud integrati in Azure. La possibilità di creare dashboard avanzate, interattive e personalizzabili, dotate di filtri e viste multiple, rende Power BI particolarmente adatto alla condivisione delle informazioni con gli stakeholder, alla redazione di report e alle analisi orientate al medio e lungo periodo.

In un contesto di gestione integrata dei dati, Microsoft Power BI rappresenta quindi uno strumento efficace per Facility Manager e figure decisionali, poiché consente di analizzare i dati nel medio e lungo periodo, confrontarli con indicatori di prestazione (KPI), individuare eventuali trend ricorrenti e supportare le scelte strategiche legate alla gestione energetica e ambientale degli edifici.

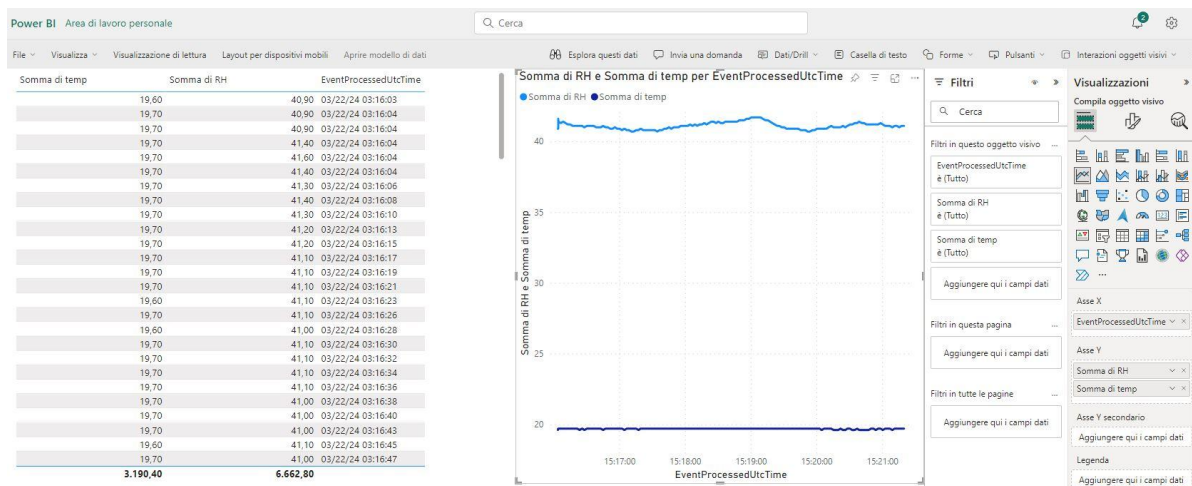


Fig. 3.36: Visualizzazione dello stream di dati in Microsoft Power BI

Per la visualizzazione puntuale e operativa delle informazioni, Autodesk Tandem può invece essere impiegato da tecnici e manutentori per il monitoraggio dei singoli asset. In questo ambiente il modello BIM assume un ruolo centrale come interfaccia tridimensionale per l’ispezione degli elementi e la consultazione dei dati associati, consentendo agli operatori di accedere in modo diretto alle informazioni rilevate dai sensori installati nell’edificio.

Grazie all’integrazione con Microsoft Azure è possibile creare collegamenti diretti tra i sensori e gli elementi del modello BIM importato in Tandem. Per ottenere la lettura del dato in Tandem è sufficiente indicare nella scheda delle connessioni la subscription utilizzata in Azure, il Resource Group, il relativo Hub IoT e il singolo dispositivo sensore, nominato ad esempio “MyDeviceMkr1010DevID” (Fig. 3.14). Nel caso studio in oggetto è stato testato l’utilizzo di due sensori contemporaneamente, uno collocato all’esterno dell’edificio e uno in un locale interno, al fine di confrontare le condizioni ambientali interne ed esterne e verificarne la corretta visualizzazione nel modello informativo (Fig. 3.37).

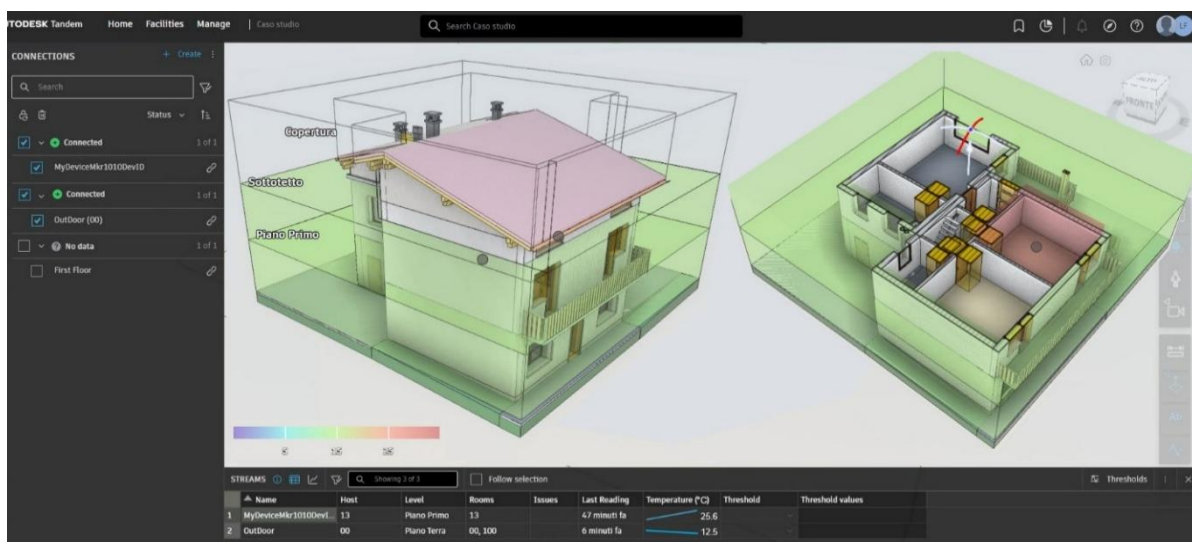


Fig. 3.37: Visualizzazione dello stream dati in Autodesk Tandem

Autodesk Tandem consente sia di caricare direttamente il modello Revit sia di lavorare con i file IFC importati nella piattaforma. Una volta associati i sensori, è possibile ispezionare il modello e configurare sistemi di allerta nel caso di superamento di soglie definite dall’utente.

Se da un lato le piattaforme proprietarie, come Autodesk Tandem o Microsoft Power BI, offrono interfacce già strutturate e strumenti pronti all'uso, dall'altro lato l'ecosistema open source mette a disposizione framework e librerie dedicate che consentono approcci più sperimentali e altamente personalizzabili.

Si è quindi cercato di riproporre lo schema base illustrato in precedenza utilizzando esclusivamente software open source.

La raccolta dei dati è demandata ad Arduino, mentre la gestione degli stessi avviene tramite il broker MQTT Eclipse Mosquitto, che crea l'ambiente di comunicazione nel quale i dati vengono ricevuti e dal quale possono essere letti e successivamente elaborati da altre applicazioni. La configurazione di Mosquitto risulta relativamente semplice: una volta completata l'installazione, è sufficiente impostare le regole del firewall per consentire il traffico in entrata e in uscita sulla porta dedicata (generalmente la porta 1883 per le connessioni non criptate, o la porta 8883 per quelle rese sicure tramite Transport Layer Security - TLS). Successivamente viene definito l'indirizzo del server MQTT, che rappresenta il nodo centrale della comunicazione e si occupa di ricevere i messaggi e distribuirli ai relativi topic. Nel caso analizzato, il topic denominato "temperatura_umidità" raccoglie e pubblica le letture di temperatura e umidità rilevate dal sensore DHT22 ogni due minuti (Fig. 3.38). Questo intervallo temporale è stato scelto per evitare un'eccessiva produzione di dati nelle fasi successive di elaborazione mediante altri software, limitando possibili rallentamenti legati all'aggiornamento continuo delle informazioni.

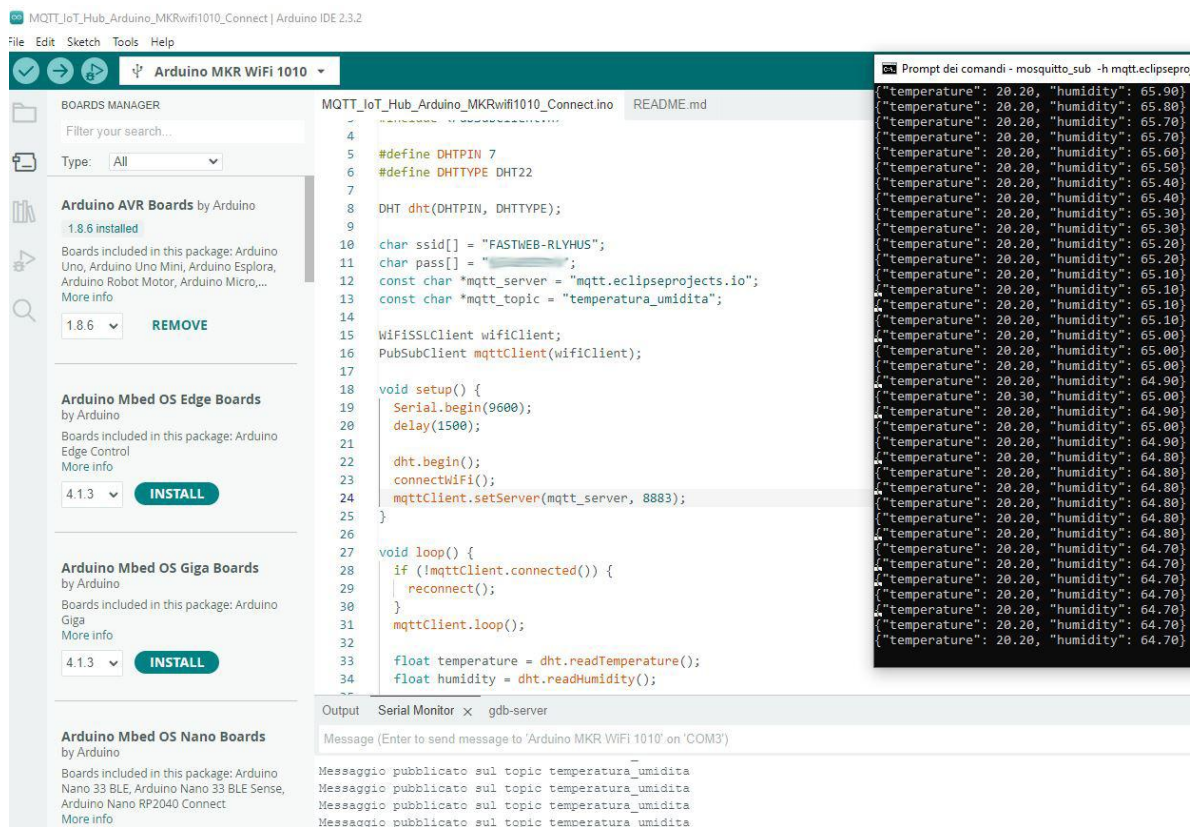


Fig. 3.38: Arduino IDE e broker MQTT Mosquitto

Una volta pubblicati nel broker MQTT, i dati risultano disponibili all'interno di un ambiente di scambio strutturato dal quale possono essere recuperati, elaborati e associati agli elementi

del modello informativo. Per la lettura e la gestione di tali flussi di dati sono stati sviluppati specifici script in linguaggio Python, realizzati in ambiente Visual Studio Code e collegati al software Blender-Bonsai.

Blender consente la creazione di script Python direttamente al suo interno, ma attualmente non presenta la possibilità di effettuare dei debug avanzati del codice. Poiché gli script sviluppati presentano una certa complessità, la possibilità di effettuare operazioni di debug risulta fondamentale. Per questo motivo è stato scelto di utilizzare un ambiente di sviluppo esterno come Visual Studio Code, che garantisce un controllo più accurato del codice e maggiore flessibilità nella fase di sviluppo.

L'interazione tra Visual Studio Code e Blender è resa possibile tramite la libreria Python *bpy*, che consente di operare direttamente in Blender da un'applicazione esterna mantenendo un collegamento continuo con il modello caricato. Una volta installata la libreria, per consentirne il corretto utilizzo, è necessario modificare i permessi della cartella Python interna a Blender (generalmente situata nel percorso "C:\Program Files\Blender Foundation\Blender 4.2\4.2\python"), abilitando i diritti di scrittura. Questa operazione è necessaria per permettere l'installazione dei moduli aggiuntivi richiesti dagli script; in assenza di tali permessi, l'esecuzione del codice risulterebbe infatti compromessa.

Completata questa configurazione, è possibile avviare Blender direttamente da Visual Studio Code, sviluppare e modificare gli script Python, eseguire le operazioni di debug e verificarne in tempo reale gli effetti sul modello IFC senza interrompere il collegamento tra ambiente di sviluppo e ambiente di visualizzazione (Fig. 3.39).

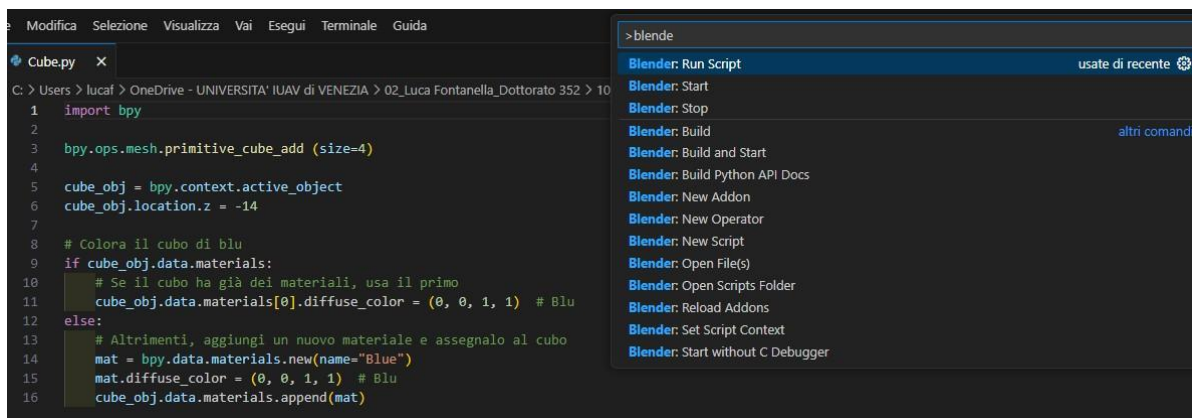


Fig. 3.39: Collegamento tra Visual Studio Code e Blender

Diventa quindi possibile programmare script Python in grado di leggere i valori pubblicati nei topic MQTT e, sulla base di soglie predefinite, assegnare specifiche colorazioni agli spazi del modello IFC importato in Blender. Il codice crea inoltre un ciclo di esecuzione continuo, consentendo l'aggiornamento automatico della colorazione degli ambienti a ogni nuova lettura del sensore.

Nel caso studio analizzato, ogni due minuti si verifica quindi la seguente sequenza operativa:

- Il sensore DHT22 legge i valori di temperatura e umidità;
- I dati vengono pubblicati in un topic MQTT (ad esempio "temperatura_umidità_esterno");
- Lo script Python eseguito in Visual Studio Code legge il valore dal topic selezionato e assegna all'elemento IFC corrispondente in Blender (ad esempio IfcSpace/00) un materiale

con un colore determinato in base a soglie predefinite (ad esempio il colore blu se la temperatura rilevata risulta essere inferiore a 20 °C, verde se compresa tra 20°C e 23°C, rosso se superiore);

- L'elemento del modello viene colorato sulla base della lettura del sensore;
- Trascorsi due minuti il sensore effettua una nuova lettura e la procedura di colorazione si ripete automaticamente.

Questo processo costituisce un ciclo continuo che rimane attivo fino all'interruzione manuale da parte dell'utente. In questo modo non è necessario avviare lo script a ogni lettura, poiché l'aggiornamento dei valori avviene in modo automatico (Fig. 3.40).

Questo approccio consente di trasformare il modello IFC in un'interfaccia dinamica di monitoraggio, nella quale la rappresentazione grafica degli ambienti non è più statica, ma riflette in modo continuo le condizioni reali rilevate dai sensori installati. La colorazione degli IFCSpace, aggiornata automaticamente a intervalli prestabiliti, permette infatti di ottenere una lettura immediata delle condizioni ambientali.

Dal punto di vista operativo, questa modalità di visualizzazione risulta particolarmente efficace nel contesto del Facility Management, poiché consente ai tecnici di individuare rapidamente eventuali situazioni anomale o valori fuori soglia direttamente all'interno del modello tridimensionale. Il modello IFC assume così un ruolo attivo nel processo di controllo, diventando uno strumento di supporto decisionale piuttosto che un mero contenitore informativo.

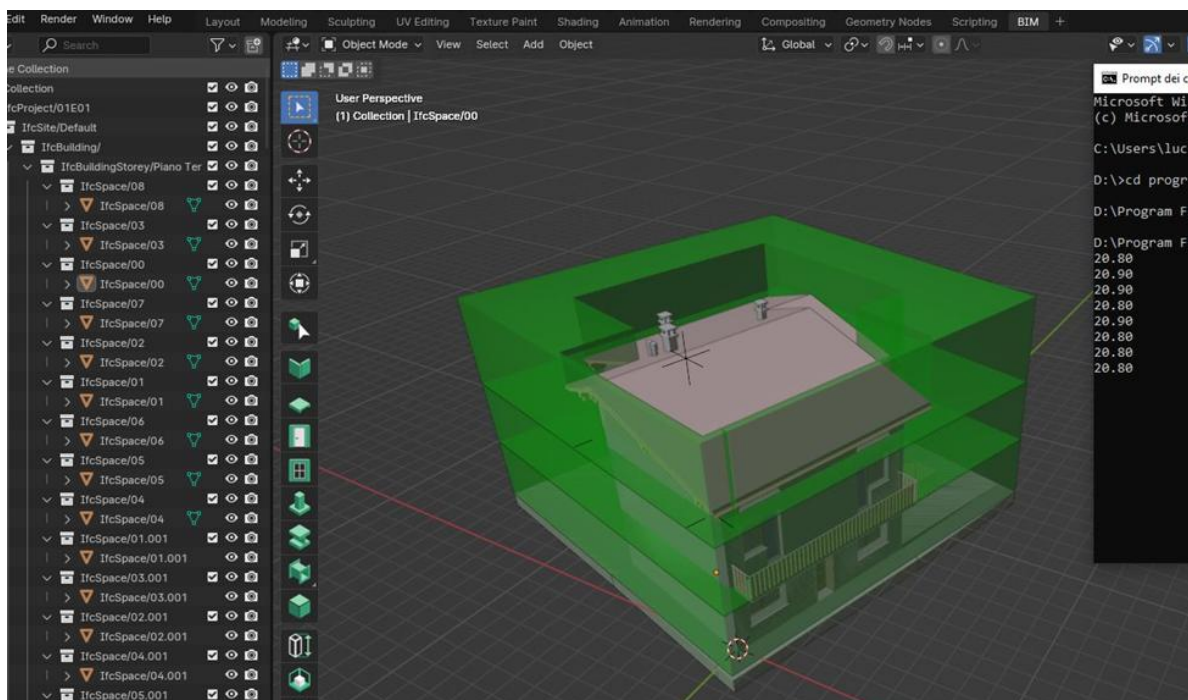


Fig. 3.40: Visualizzazione dello stream di dati nei modelli IFC

Si può quindi affermare che, con poche righe di codice, è stato possibile riprodurre con strumenti open source il risultato ottenuto in precedenza mediante i soli software proprietari. Una volta verificata la validità e la stabilità della procedura proposta, il modello è stato ulteriormente arricchito con nuovi sensori e con un numero maggiore di informazioni

elaborate, allo scopo di verificarne il funzionamento anche in scenari più complessi rispetto alla semplice lettura di un singolo parametro.

In particolare, si è voluto rappresentare mediante palette cromatiche il valore medio previsto di comfort termico (PMV) percepito dagli utenti sulla base del modello di Fanger.

Lo script Python, partendo da alcune costanti quali velocità dell'aria, tasso metabolico e isolamento dell'abbigliamento (assumendo inoltre che la temperatura radiante sia pari a quella dell'aria), utilizza i valori di temperatura e umidità effettivamente rilevati dal sensore e calcola a ogni lettura il PMV. Il valore risultante viene quindi rappresentato mediante la colorazione degli ambienti IfcSpace nei quali sono collocati i sensori.

In questo modo la rappresentazione cromatica degli ambienti consente all'utente di ottenere un riscontro visivo immediato delle condizioni di comfort percepito, mentre la visualizzazione testuale associata agli spazi fornisce l'indicazione puntuale dei valori di temperatura rilevati (Fig. 3.41). Sia la colorazione basata sull'indice PMV sia i testi informativi vengono aggiornati automaticamente a ogni nuova lettura del sensore secondo l'intervallo temporale definito in fase di configurazione tramite Arduino IDE.

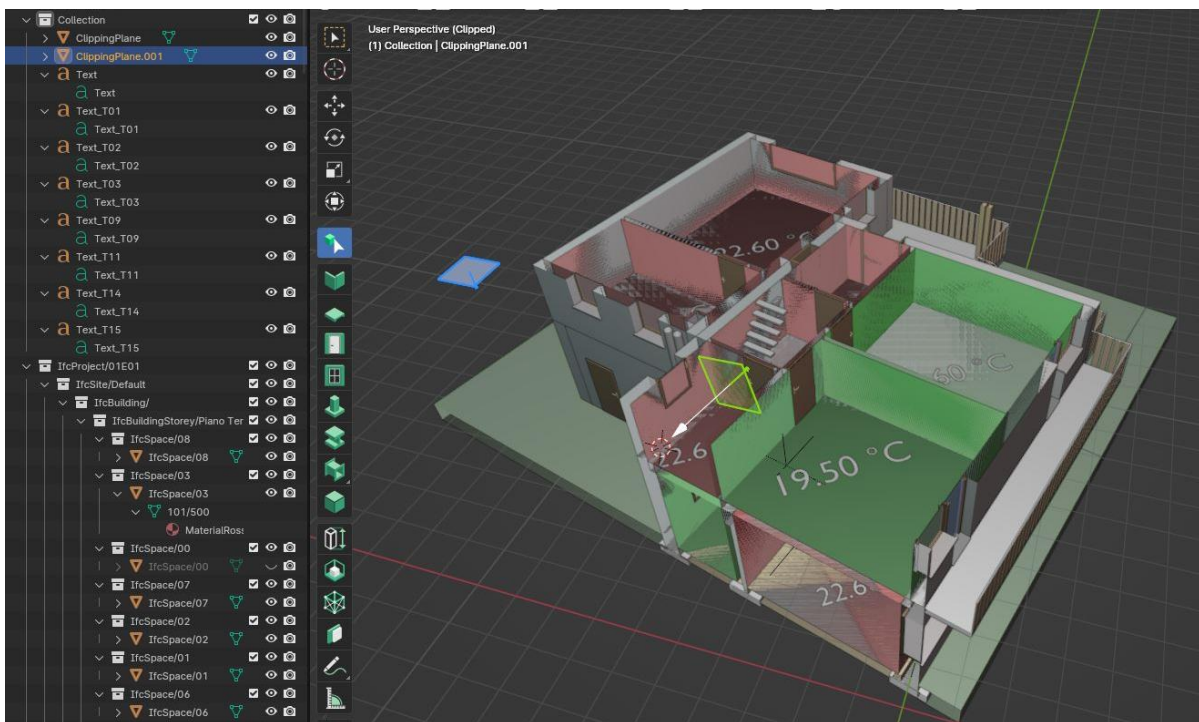


Fig. 3.41: PMV e temperatura nei locali monitorati

Questa fase di sperimentazione riveste un ruolo particolarmente significativo all'interno del flusso di lavoro proposto, poiché dimostra come il sistema sviluppato non si limiti alla mera ricezione e visualizzazione dei dati provenienti dalla sensoristica IoT, ma sia in grado di eseguire calcoli ed elaborazioni più complesse direttamente collegate al modello informativo. Tra i possibili sviluppi futuri rientra innanzitutto l'incremento del numero di sensori installati negli ambienti. Nella configurazione attuale è stato utilizzato un singolo sensore per ogni locale, con conseguente colorazione omogenea dell'intero IfcSpace associato. Nel caso di ambienti molto ampi, come ad esempio grandi sale museali, per ottenere dati più rappresentativi sarebbe necessario installare un numero maggiore di sensori ambientali. In tali situazioni la colorazione uniforme dell'intero spazio non risulterebbe adeguata, poiché

basata su un unico valore di riferimento. Una possibile soluzione consiste nell'introdurre una griglia spaziale non visibile all'utente finale, all'interno della quale colorare in modo differenziato le sole porzioni di ambiente interessate dalle letture dei sensori, generando così una vera e propria mappa di calore.

Un ulteriore sviluppo potrebbe riguardare la creazione di API dedicate per la gestione dinamica delle variabili di input. Queste potrebbero essere collegate, ad esempio, alle survey degli utenti sul comfort percepito, includendo parametri del modello di Fanger quali tipologia di abbigliamento o attività svolta al momento della compilazione del questionario, permettendo così un calcolo del PMV più aderente alle condizioni reali.

Analogamente, la realizzazione di applicazioni web o mobile consentirebbe di estendere la fruizione delle informazioni anche a utenti non esperti, semplificando l'accesso ai dati e migliorando l'operatività nella gestione degli edifici.

Gli script Python, le configurazioni dei protocolli di comunicazione (ad esempio MQTT) e i file di supporto utilizzati per lo stream e la visualizzazione dei dati descritti nel presente paragrafo sono stati pubblicati nella repository GitHub dedicata ai workflow IoT della ricerca [182].

In particolare, la repository è organizzata in sezioni tematiche che riflettono le diverse modalità di acquisizione e gestione dei dati analizzate nel lavoro:

- la cartella "01_Arduino IDE prototypes" raccoglie i prototipi sviluppati in ambiente Arduino IDE per l'acquisizione dei dati dai sensori e la loro trasmissione verso piattaforme cloud o broker MQTT;
- la cartella "02_Proprietary streaming" contiene gli esempi e le configurazioni relative allo stream dei dati mediante piattaforme e servizi proprietari, utilizzati come riferimento per l'analisi dello stato dell'arte;
- la cartella "03_Open source streaming" include le implementazioni basate esclusivamente su tecnologie open source, comprendenti gli script Python per la lettura dei database, la gestione dei flussi IoT e l'integrazione con i modelli IFC all'interno di Blender-Bonsai.

Questa struttura consente di rendere esplicito il confronto tra approcci differenti e di facilitare la comprensione, la replicabilità e l'estensione del metodo proposto.

3.2.3 Visualizzazione dati da database

Finora l'attenzione si è concentrata sulla visualizzazione di dati rilevati in tempo reale o, più correttamente, prossimi al tempo reale, considerando il fisiologico scarto temporale tra la misurazione effettuata dal sensore e l'elaborazione del dato nel software. Un ulteriore aspetto di particolare rilevanza per la gestione degli edifici riguarda tuttavia l'analisi dei dati archiviati nel tempo.

Lavorare su uno storico di misurazioni consente infatti di ottenere una visione più ampia e approfondita dello stato dell'edificio e permette di pianificare eventuali interventi migliorativi con maggiore consapevolezza e precisione. La scelta di estendere l'ambito della ricerca anche all'analisi e all'utilizzo di dati storici archiviati in database strutturati nasce quindi dall'esigenza di integrare la visione istantanea delle prestazioni dell'edificio, tipica dei sistemi di monitoraggio in tempo reale, con una lettura del comportamento dell'edificio nel medio e lungo periodo. L'analisi di serie temporali estese consente infatti di individuare trend

ricorrenti, anomalie persistenti e comportamenti stagionali che difficilmente emergerebbero attraverso singole misurazioni puntuali.

Grazie alla collaborazione con il Royal Institute of Technology di Stoccolma (KTH), è stato possibile lavorare sulla visualizzazione di grandi quantità di dati archiviati in database SQL. In primo luogo è stato selezionato l'edificio di riferimento da utilizzare come caso studio, situato all'interno del campus universitario (Testbed EM). L'edificio è stato modellato mediante Autodesk Revit sulla base dei rilievi CAD forniti e successivamente esportato in formato IFC 4.3 (Fig. 3.42).

Tale operazione ha consentito di affiancare alle geometrie del modello informativo anche riferimenti puntuali ai sensori installati e alla loro collocazione negli ambienti, rendendo possibile l'associazione univoca tra i dati misurati e gli spazi monitorati. Al fine di semplificare la procedura e rendere il caso studio maggiormente gestibile, l'analisi è stata limitata ai soli dati relativi ai consumi energetici e all'acqua calda sanitaria.

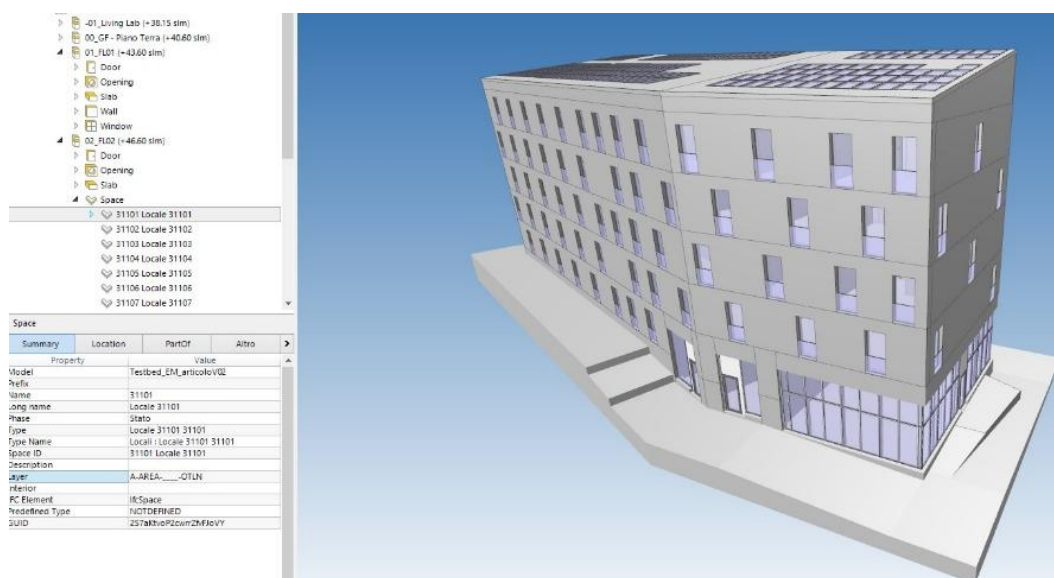


Fig. 3.42: Testbed EM - KTH

All'interno dell'edificio è stato selezionato il terzo livello come piano tipo oggetto di analisi. Tale scelta è stata dettata sia da ragioni pratiche, ovvero la presenza di un numero adeguato di sensori già installati e funzionanti, sia da motivazioni metodologiche, in quanto il piano rappresenta un campione significativo dell'intero edificio (Fig. 3.43).

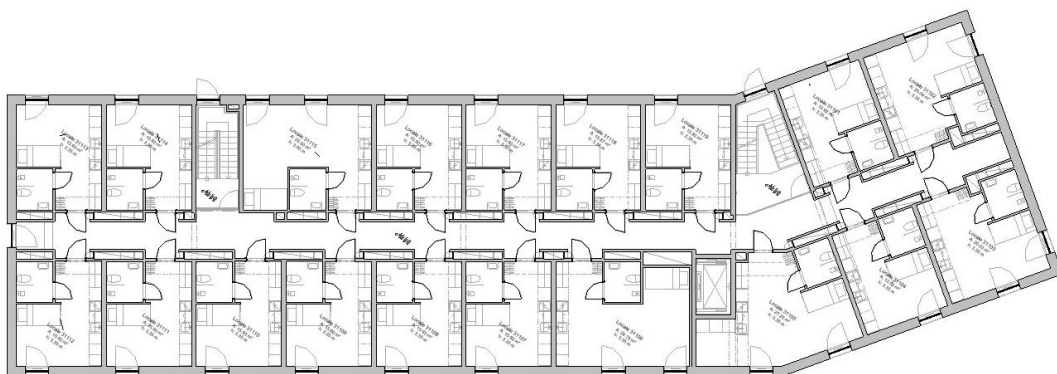


Fig. 3.43: Piano tipo Testbed EM

È stato sviluppato un primo codice Python con lo scopo di leggere e interrogare da remoto il database contenente tutti i dati rilevati dai sensori installati nell'edificio.

Al fine di garantire la sicurezza dei dati e la tutela della privacy, il codice non include direttamente le credenziali di accesso al database principale. Tali informazioni vengono invece richiamate tramite un file esterno, gestito esclusivamente dall'amministratore di rete, nel quale sono archiviate le credenziali necessarie per l'autenticazione. Questa modalità operativa offre un duplice vantaggio: da un lato impedisce a utenti non autorizzati di accedere o manipolare i dati sensibili, dall'altro elimina il rischio che le credenziali vengano accidentalmente diffuse o compromesse nel caso in cui il codice venga condiviso o reso pubblico. Solo chi è autorizzato e dispone delle credenziali corrette può quindi effettuare operazioni di lettura sul database, preservando l'integrità del sistema e la riservatezza delle informazioni raccolte.

Per scopi di ricerca si è scelto di ridurre l'enorme quantità di dati disponibile, che nel database generale supera i 4 terabyte, concentrandosi su un dataset più contenuto, pari a circa 500 megabyte. Questo approccio consente di lavorare con informazioni complete ma gestibili, senza perdere significatività, in quanto il piano tipo selezionato può essere considerato rappresentativo anche per le stanze degli altri piani e per gli altri edifici.

Degli oltre 7.000 sensori installati negli edifici monitorati all'interno del campus, sono stati selezionati due sensori per appartamento del piano tipo, nello specifico quelli relativi ai consumi elettrici e all'acqua calda sanitaria. Il periodo di osservazione preso in esame va da gennaio 2023 a febbraio 2024.

Al fine di creare un collegamento univoco tra i sensori e gli ambienti nei quali sono collocati, si è reso necessario introdurre una fase intermedia di organizzazione delle informazioni. Tale fase è stata realizzata intervenendo direttamente nel file Excel fornito dal gestore del database, contenente i codici univoci dei sensori, il tipo di dato monitorato e l'ambiente di riferimento, integrandolo con ulteriori attributi funzionali alla creazione di un database personalizzato (Fig. 3.44).

In particolare, sono stati eseguiti i seguenti passaggi:

- Assegnazione di alias ai singoli sensori, al fine di ridurre il numero di byte utilizzati e velocizzare l'intero processo di elaborazione dei dati. Passare da una nominazione alfanumerica estesa, ad esempio "{19403080-2D5C-494D-A237-BCB6027E2B6B}", a un "id_alias" sintetico (ad esempio "001") consente di ottimizzare significativamente le operazioni di lettura e scrittura, pur mantenendo il riferimento univoco al sensore;
- Inserimento degli IfcEntity_id, ovvero l'indicazione degli IfcSpace del modello IFC nei quali sono collocati i sensori. Poiché il gestore del database fornisce l'identificativo dell'appartamento (apartmentnum), l'associazione con il relativo IfcSpace permette di creare un collegamento diretto e univoco tra sensori e modello informativo;
- Introduzione della colonna "download_keyword", utilizzata dallo script Python per individuare selettivamente quali dati scaricare dal database generale e costruire un database SQL più leggero, contenente esclusivamente le informazioni di interesse.

	id	id_alias	apartmentnum	title	bctsensorid	id	bctid	typeclassification	id	frequencysec	lfcEntity_id	tdp_id	download_keyword
460	{19403080-2D5C-49AD-A237-BCB6027E2B6B}		31101	Lgh el	{D95C5B4F-...}	{D95C5B4F-...}	{C457329D-...}	el_1	{C457329D-...}	47	lfcSpace/31101	Lgh	311xx - 2024-12-04
461	{427647F4-A81A-4AE7-9868-F535FBCBE641}		31101	Lgh varmvatten	{2A87877D-...}	{2A87877D-...}	{C457329D-...}	v_vv	{C457329D-...}	47	lfcSpace/31101	Lgh	311xx - 2024-12-04
462	{78E2BA7E-A0F9-490B-B375-17885ED6C2B0}		31102	Lgh el	{78F1B4F0-...}	{78F1B4F0-...}	{AA30B870-...}	el_1	{AA30B870-...}	47	lfcSpace/31102	Lgh	311xx - 2024-12-04
463	{5E918B39-19DD-4DB9-A3B9-1EFC182A08BB}		31102	Lgh varmvatten	{0874A2EE-...}	{0874A2EE-...}	{AA30B870-...}	v_vv	{AA30B870-...}	47	lfcSpace/31102	Lgh	311xx - 2024-12-04
464	{8F99C683-9CF9-45E7-9E8F-BD1A1D190E19}		31103	Lgh el	{0F4A1284-...}	{0F4A1284-...}	{3DF4325E-...}	el_1	{3DF4325E-...}	48	lfcSpace/31103	Lgh	311xx - 2024-12-04
465	{209B0C4E-19E7-41E2-9632-687BE967D508}		31103	Lgh varmvatten	{85659E02-...}	{85659E02-...}	{3DF4325E-...}	v_vv	{3DF4325E-...}	48	lfcSpace/31103	Lgh	311xx - 2024-12-04
466	{C57CA0DF-E0F0-43DD-95D6-78BC7C925FBE}		31104	Lgh el	{E04B942F-...}	{E04B942F-...}	{F9EB19B6-...}	el_1	{F9EB19B6-...}	49	lfcSpace/31104	Lgh	311xx - 2024-12-04
467	{737C930A-3A32-47CA-A4D9-0332F888E03F}		31104	Lgh varmvatten	{AA40FB6E-...}	{AA40FB6E-...}	{F9EB19B6-...}	v_vv	{F9EB19B6-...}	49	lfcSpace/31104	Lgh	311xx - 2024-12-04
468	{56B58BA8-6BD2-4977-A886-E114F0592459}		31105	Lgh el	{A9BBE6BE-...}	{A9BBE6BE-...}	{1A57290B-...}	el_1	{1A57290B-...}	50	lfcSpace/31105	Lgh	311xx - 2024-12-04
469	{84C2CFC5-5389-49F3-A013-18C69AD980AD}		31105	Lgh varmvatten	{6EC1374A-...}	{6EC1374A-...}	{1A57290B-...}	v_vv	{1A57290B-...}	50	lfcSpace/31105	Lgh	311xx - 2024-12-04
470	{001008CF-C6C1-47ED-BD51-2909426C555B}		31106	Lgh el	{310A9C97-...}	{310A9C97-...}	{721EE815-...}	el_1	{721EE815-...}	51	lfcSpace/31106	Lgh	311xx - 2024-12-04
471	{73A55FC1-65B3-4DC5-95F0-9184C8EA5631}		31106	Lgh varmvatten	{7B06276D-...}	{7B06276D-...}	{721EE815-...}	v_vv	{721EE815-...}	51	lfcSpace/31106	Lgh	311xx - 2024-12-04
472	{04626955-AFF6-4089-8017-61D89125E9BF}		31107	Lgh el	{1D47A1EC-...}	{1D47A1EC-...}	{1745D142-...}	el_1	{1745D142-...}	52	lfcSpace/31107	Lgh	311xx - 2024-12-04
473	{065F7D8B-6005-4146-A98F-594CA22F17F}		31107	Lgh varmvatten	{CC8C2DE3-...}	{CC8C2DE3-...}	{1745D142-...}	v_vv	{1745D142-...}	52	lfcSpace/31107	Lgh	311xx - 2024-12-04
474	{9406AF41-C8DA-48C8-B7DE-DC924E59F238}		31108	Lgh el	{EA68264C-...}	{EA68264C-...}	{D34A5239-...}	el_1	{D34A5239-...}	53	lfcSpace/31108	Lgh	311xx - 2024-12-04
475	{778C5CC6-B9A6-4922-9BA0-BA0BC8887095}		31108	Lgh varmvatten	{A749A102-...}	{A749A102-...}	{D34A5239-...}	v_vv	{D34A5239-...}	53	lfcSpace/31108	Lgh	311xx - 2024-12-04

Fig. 3.44: Codici univoci dei sensori del Testbed EM

Il codice Python crea quindi un nuovo database SQLite (Fig. 3.45) contenente tutte le letture dei sensori desiderati, identificati mediante la “download_keyword” del file Excel. All’interno del nuovo database personalizzato il valore “mvarde”, indica il valore letto dal sensore, identificato con “bctinputid” (ovvero l’id_alias visto precedentemente nel file Excel), all’istante indicato nella colonna “tdpunkt”, espresso in formato Unix, cioè come numero di secondi trascorsi dalla mezzanotte UTC del 1° gennaio 1970.

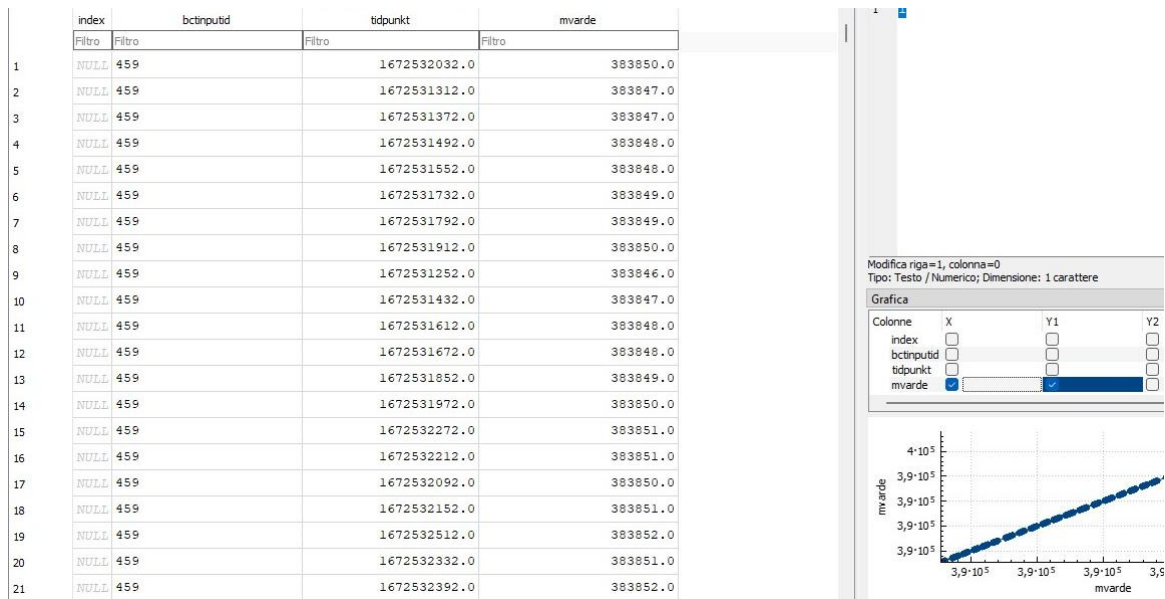


Fig. 3.45: Database SQL

Questo nuovo database costituisce la base di partenza per le visualizzazioni mediante Blender e il tool testbed. A tale scopo è stato realizzato un ulteriore script Python e un middleware collocato all’interno del file Excel utilizzato per la definizione dei sensori. Tramite questa interfaccia l’utente può selezionare quali dati visualizzare, in quale momento e in quali appartamenti.

Il file bctinput.xls, già utilizzato nella fase precedente, è stato quindi ampliato mediante la creazione di una scheda denominata “QUERIES”, che funge da API di interfaccia tra l’utente e la visualizzazione finale. In questa pagina è infatti possibile indicare quale sensore si intende

rappresentare all'interno del modello, nonché il giorno e l'ora della misurazione desiderata. È inoltre possibile definire, tramite un'ulteriore scheda creata ad hoc all'interno del medesimo file e denominata "SETTINGS", gli aspetti grafici della rappresentazione, quali ad esempio la palette cromatica associata ai valori misurati.

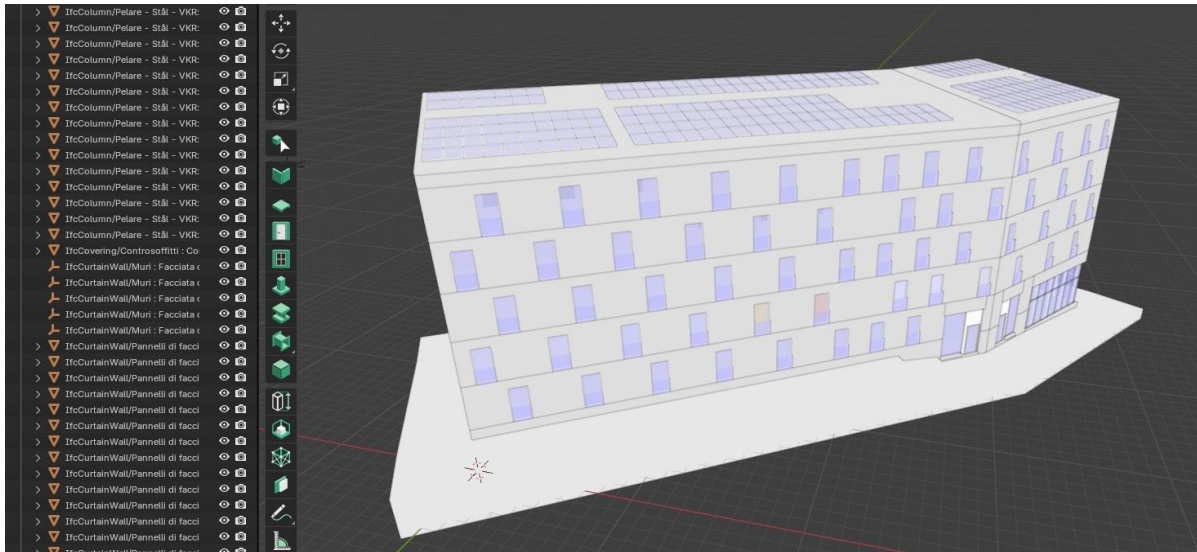


Fig. 3.46: Modello IFC visualizzato in Blender-Bonsai

Il database risulta ora interrogabile e utilizzabile per la visualizzazione dei dati nel modello IFC importato all'interno di Blender (Fig. 3.46). A tale scopo viene utilizzato un ulteriore script Python, che legge la richiesta effettuata dall'utente tramite la pagina QUERIES del file Excel (Fig. 3.47), successivamente ricerca il dato corrispondente nel database SQLite creato in precedenza e infine lo visualizza all'interno del modello IFC in Blender (Fig. 3.48). Analogamente a quanto visto in precedenza, la visualizzazione e il continuo aggiornamento dei dati, sia attraverso la colorazione dei locali sia mediante testi collocati al centro degli spazi riportanti i valori letti, sono garantiti dal collegamento costante tra Visual Studio Code e Blender-Bonsai.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	select bctinputid, avg(mvarde) as value from df_data where bctinputid = 1 and tidpunkt > 1679000000 and tidpunkt <= 1679001000 GROUP BY bctinputid							
2	[Alpha]	[Alpha]	[yyyy-mm-dd hh:mm]	[h]				
3	Sensor - Type	Sensor - Ref. Position	Date - Start	Time - Start	Time span	Date and Time - Start	Date and Time - Stop	
4	Lgh varmvatten	31101	05/02/2023	10:45	2	1675593900	1,676E+09	
5	Lgh el	31102	02/07/2023	11:00	2	1688295600	1,688E+09	
6	Lgh el	31103	02/07/2023	11:00	2	1688295600	1,688E+09	
7	Lgh el	31104	02/07/2023	11:00	2	1688295600	1,688E+09	
8	Lgh el	31105	02/07/2023	11:00	2	1688295600	1,688E+09	
9	Lgh el	31106	02/07/2023	11:00	2	1688295600	1,688E+09	
10	Lgh varmvatten	31107	02/07/2023	23:00	2	1688338800	1,688E+09	
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								

Fig. 3.47: Middleware API per l'interrogazione dei dati

Grazie a questa configurazione non è quindi necessario avviare ogni volta lo script Python per eseguire una nuova interrogazione del database. È sufficiente operare direttamente sulla scheda “QUERIES” di Excel, dalla quale vengono richiamati i dati necessari e colorati di conseguenza gli IfcSpace corrispondenti nel modello visualizzato in Blender-Bonsai.

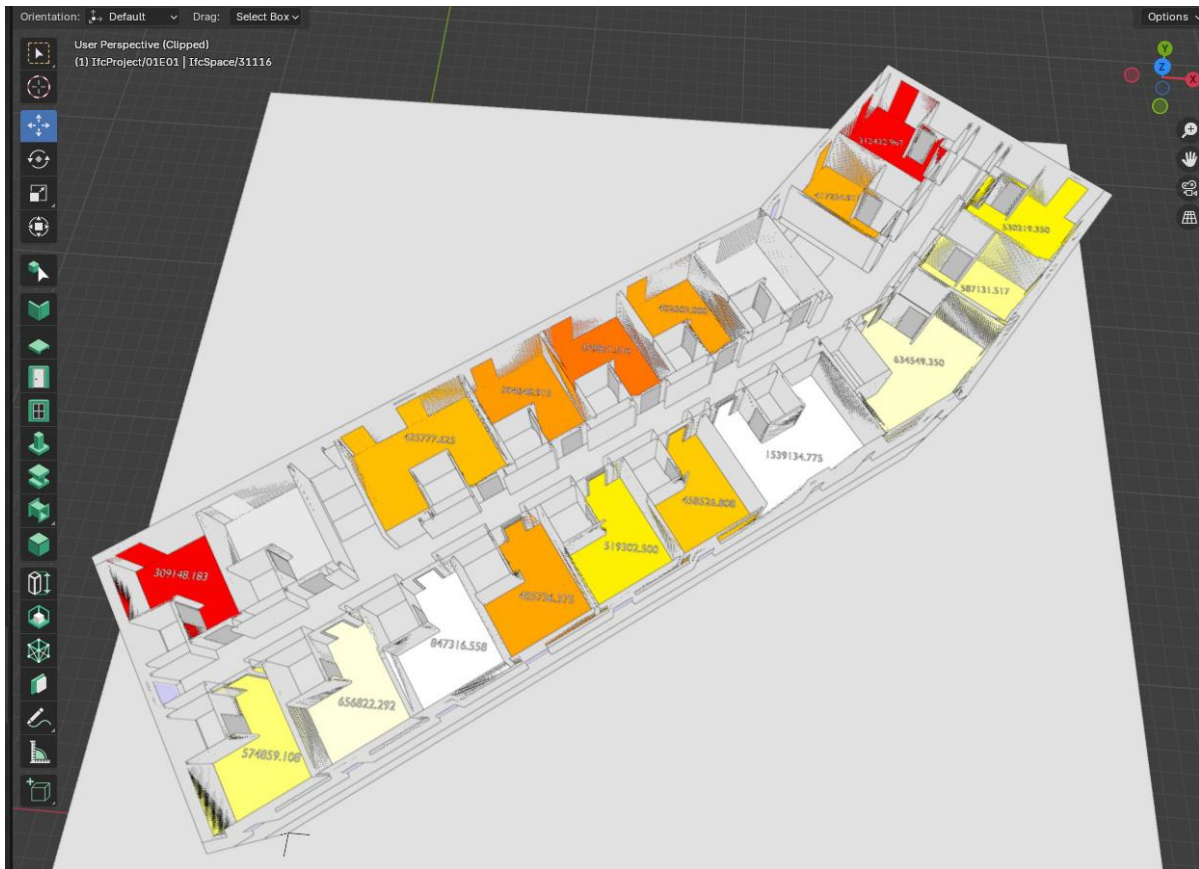


Fig. 3.48: Visualizzazione dei dati nel modello

Riassumendo, il flusso di lavoro per l’interrogazione di database con grandi quantità di dati e la loro visualizzazione nei modelli IFC è reso possibile dalla seguente procedura:

- Creazione di un database con dimensioni ridotte rispetto a quello generale gestito dal Live-In Lab, una semplificazione utile ai fini della ricerca che non inficia la validità dell’intero processo;
- Il nuovo database SQLite, circoscritto ai soli sensori relativi al piano tipo scelto, viene creato tramite uno script Python. Lo script accede al database generale SQL del KTH mediante credenziali esterne visibili solo all’amministratore del database stesso, ed estrae i soli dati selezionati, indicati nel file Excel “bctinput.xlsx”;
- L’utilizzo della “download_keyword” all’interno di “bctinput.xlsx” rende univoche le informazioni, mentre gli “id_alias” diminuiscono ulteriormente le dimensioni del database;
- Il nuovo database ridotto può essere interrogato grazie a un secondo script Python che, mediante il middleware creato all’interno del file “bctinput.xlsx”, legge le richieste dell’utente ed estrae i dati da SQLite.
- Il medesimo script si occupa del collegamento con il modello IFC importato in Blender e visualizza il dato colorando il locale nel quale è collocato il sensore sulla base del valore

- letto nell'istante selezionato dalla scheda "QUERIES". Ai fini di una lettura più completa del dato, viene inoltre generato un testo collocato nel locale e riportante il valore del sensore;
- A ogni aggiornamento della richiesta effettuata nella scheda "QUERIES" di "bctinput.xlsx", una volta salvato il file, il dato in Blender viene aggiornato automaticamente. Non vi è quindi la necessità di avviare lo script Python a ogni nuova interrogazione.

Il processo sopra descritto può essere schematizzato come mostrato in Fig. 3.49.

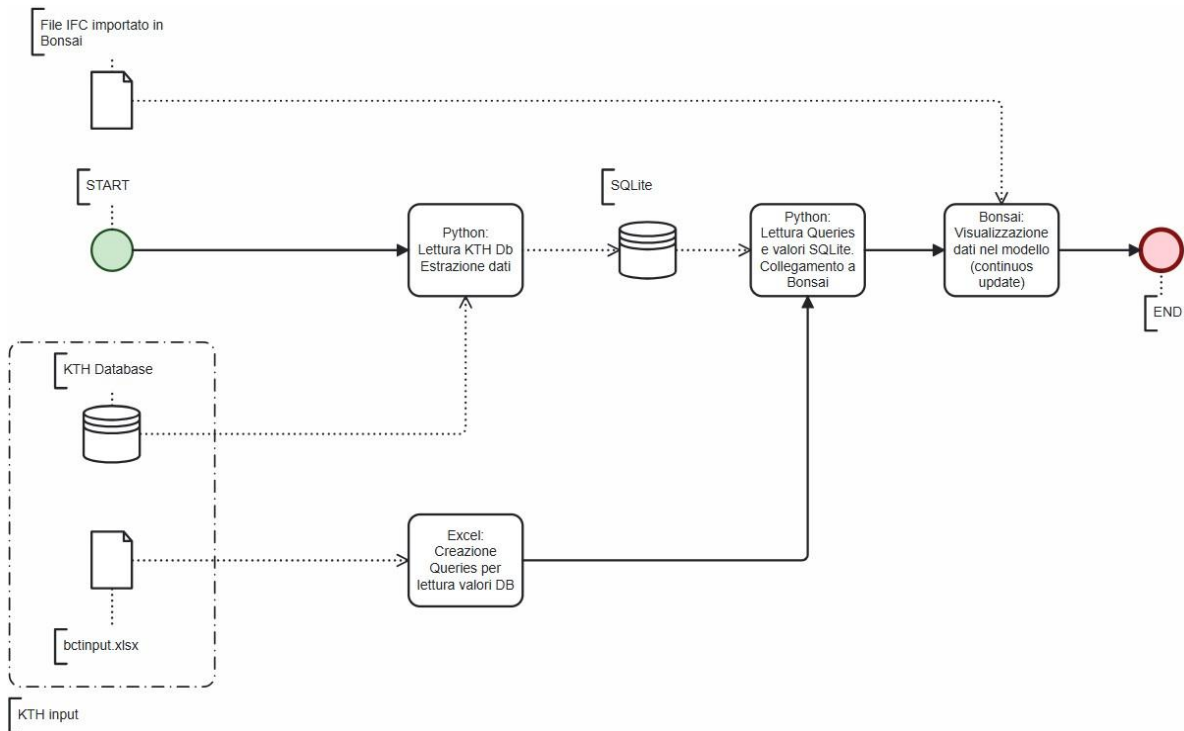


Fig. 3.49: Visualizzazione dei dati da database

È stata quindi dimostrata la fattibilità della visualizzazione di dati tramite l'interrogazione di database, che si va a integrare a quella relativa allo stream in tempo descritta nel paragrafo precedente.

Anche in questo caso i codici sono reperibili nella repository GitHub dedicata alla consultazione e visualizzazione di dati contenuti in database all'interno dei modelli (cartella "04_Database driven visualization" [182]).

Gli sviluppi futuri possono riguardare l'implementazione della visualizzazione dei modelli direttamente in pagine HTML e la possibilità di effettuare le query in specifiche applicazioni. In questo modo, riducendo la necessità di utilizzare software specifici o codici Python, la diffusione di questi metodi potrebbe essere ulteriormente ampliata. Dal punto di vista del Facility Management, come verrà approfondito nel paragrafo successivo, la possibilità di visualizzare lo storico dei dati consente di effettuare valutazioni sul comportamento dell'edificio nel medio e lungo periodo da un punto di vista termico, suggerendo interventi migliorativi più mirati rispetto alle criticità rilevate.

3.2.4 Facility Management

Le tecnologie illustrate nei paragrafi precedenti, quali la visualizzazione dei dati nei modelli a partire dalle letture dei sensori, l'interrogazione diretta dei database e la possibilità di

segnalare problematiche tramite applicazioni dedicate, consentono di integrare in modo dinamico e continuo i processi di monitoraggio, analisi e gestione dell'edificio.

Nel più ampio contesto del Facility Management, questi strumenti costituiscono il tramite attraverso il quale le informazioni provenienti dall'IoT e dal modello informativo confluiscono in una piattaforma unificata, capace di supportare decisioni operative e strategiche in tempo reale.

3.2.4.1 Monitoraggio condizioni microclimatiche

Nell'ambito degli edifici storici contenenti elementi di pregio quali, ad esempio, tele e sculture, come nel caso delle Gallerie dell'Accademia di Venezia, il monitoraggio costante delle condizioni microclimatiche degli ambienti riveste un ruolo di primaria importanza ai fini della conservazione preventiva delle opere.

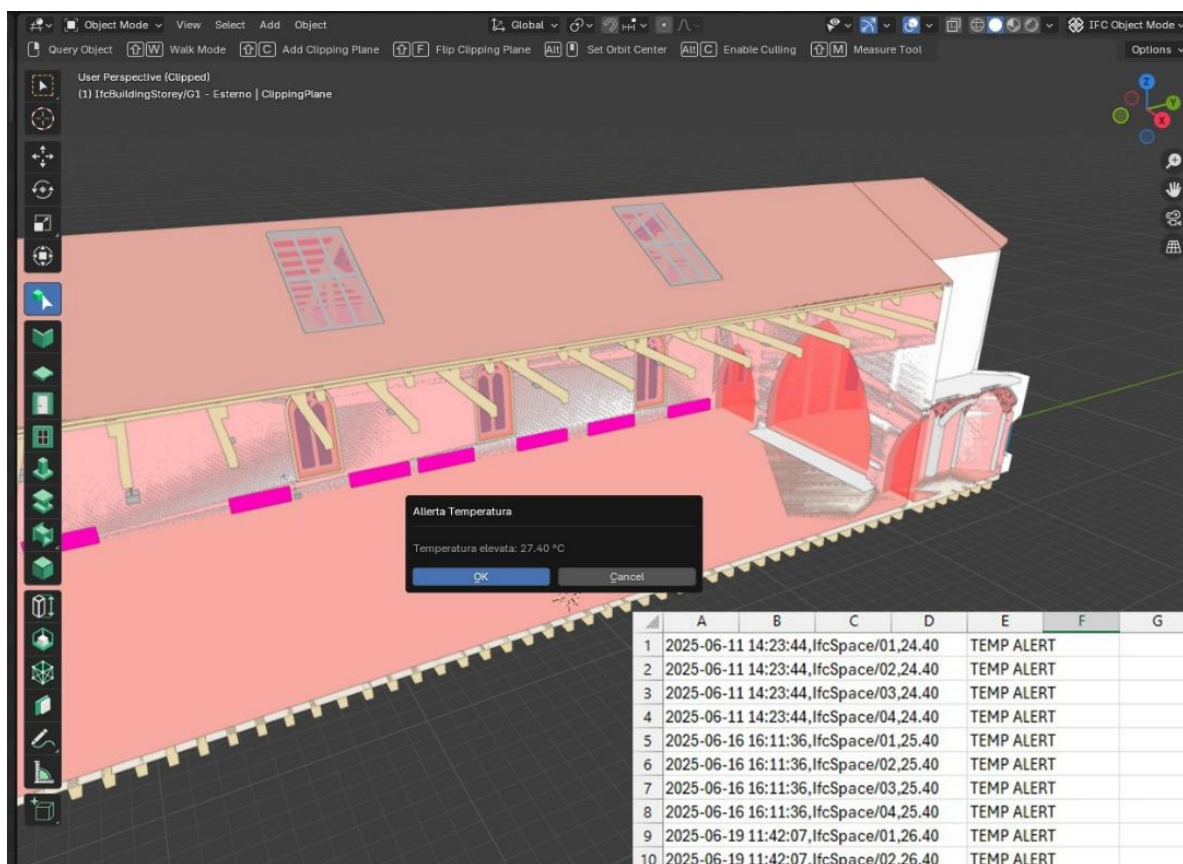


Fig. 3.50: Alert del superamento delle soglie di temperatura previste

A tal fine possono essere assunti come riferimento i valori indicati dalle normative e dalle linee guida consolidate. In particolare, la norma UNI 10829:1999 e la EN 15757:2010 definiscono intervalli e criteri di controllo tra loro in parte affini, pur basandosi su approcci differenti: la prima segue un'impostazione prescrittiva, mentre la seconda adotta un approccio conservativo fondato sull'analisi storica delle condizioni microclimatiche.

Per i dipinti su tela la UNI 10829:1999 indica i seguenti valori ottimali:

- Temperatura: 19–24 °C;
- Umidità relativa (UR): 40–55 %;
- Escursione giornaliera massima della temperatura: ± 1 °C;

- Escursione giornaliera massima dell'UR: ± 5 %;
- Illuminamento: 150–200 lux per materiali sensibili;

ASHRAE, nell'edizione del 2019, indica per i valori di Classe B, compatibile con edifici storici:

- Umidità relativa: 30–70 %, idealmente 40–60 %;
- Temperatura: ≤ 25 –26 °C, con tolleranza stagionale;

L'adozione di tali valori consente di bilanciare la conservazione preventiva con i vincoli architettonici e il comfort ambientale, configurandosi come un criterio operativo per la gestione degli edifici storici.

Nel corso della presente ricerca, il controllo delle soglie di temperatura e umidità è stato realizzato tramite un sistema di alert che evidenzia in tempo reale il superamento dei limiti mediante la colorazione degli spazi interessati e la comparsa di avvisi sotto forma di pop-up direttamente all'interno del software.

Contestualmente, un file CSV raccoglie tutte le misurazioni che hanno generato alert (Fig. 3.50), creando uno storico completo che può essere utilizzato per analisi successive, facilitando così sia la scelta del tipo di interventi manutentivi mirati sia la valutazione dell'efficacia delle strategie di controllo ambientale.

Inoltre, i dati rilevati dai sensori possono essere associati a singole opere o a specifici elementi dell'edificio, così da ottenere un riscontro diretto sulle condizioni conservative di ciascun bene e favorire una gestione più mirata e consapevole.

Nel caso studio delle Gallerie dell'Accademia, ad esempio, è stata simulata la raccolta di dati provenienti da sensori associati alle opere collocate nell'abside della Sala XXIII (Fig. 3.51). Non essendo stato possibile effettuare la verifica direttamente in sito, in quanto la sala è attualmente interessata da lavori di restauro e le opere sono provvisoriamente collocate in altra sede, l'invio dei dati è stato simulato mediante la trasmissione manuale via broker MQTT. Tale scelta non inficia la validità del sistema in quanto le procedure coincidono con quelle già descritte nel caso dello stream realizzato tramite i microcontrollori Arduino.

Le opere presenti nell'abside costituiscono un banco di prova particolarmente significativo, in quanto sono composte da materiali differenti, quali dipinti a olio su tela e sculture in marmo, ciascuno dei quali richiede specifici livelli di temperatura, umidità e altri parametri da rispettare ai fini della corretta conservazione.

Una volta definita la strategia relativa ai parametri limite da utilizzare, ricavati ad esempio dalla UNI 10829:1999 o da ASHRAE 2019, questi sono stati associati alle singole opere. Successivamente è stato realizzato il codice Python di collegamento tra questi parametri e gli elementi presenti nel modello IFC visualizzato in ambiente Blender-Bonsai. Una volta inviati i dati simulati mediante il protocollo MQTT, gli elementi vengono colorati in funzione del rispetto o meno dei parametri di riferimento.

Nel caso del superamento dei valori previsti, la comparsa di un pop-up nel modello facilita l'individuazione della problematica da parte del Facility Manager (Fig. 3.52).



Fig. 3.51: Galleria dell'Accademia di Venezia, Sala XXIII vista dell'abside



Fig. 3.52: Monitoraggio opere e visualizzazione alert

In questo esempio si può osservare come le tele collocate nel pannello di sinistra, superando i valori di temperatura previsti, vengono evidenziate in rosso nel modello. Ciò non avviene per le tele situate nella parte opposta, che rientrano ancora nei limiti previsti e presentano quindi

una colorazione verde. Tale differenza, nonostante i materiali siano i medesimi, indica che la criticità è localizzata in quella specifica area, ad esempio per la presenza di una fonte di calore eccessiva in prossimità delle opere.

L'aumento del livello di dettaglio dei parametri monitorati in relazione ai materiali delle singole opere consente di effettuare analisi e controlli più approfonditi, contribuendo in questo modo alla prevenzione del deterioramento dei materiali che costituiscono il patrimonio storico. Nel caso descritto, infatti, se ci si fosse limitati all'utilizzo di generici sensori ambientali, in spazi così ampi difficilmente la problematica rilevata sarebbe emersa in tempi rapidi.

Questo tipo di analisi può inoltre costituire uno strumento utile anche nella fase di definizione degli allestimenti espositivi, fornendo ai curatori delle mostre indicazioni sulle possibili criticità degli ambienti in relazione ai materiali delle opere da esporre.

3.2.4.2 Segnalazione guasti

Un ulteriore strumento rilevante nell'ambito della gestione degli edifici riguarda la possibilità di effettuare segnalazioni direttamente in loco relative a guasti o altre problematiche rilevate. Grazie agli strumenti illustrati nei paragrafi precedenti, è possibile strutturare una procedura che supporti il Facility Manager nell'individuazione delle anomalie e nella pianificazione tempestiva degli interventi necessari alla loro risoluzione.

Nel sistema sviluppato, lo script Python legge le segnalazioni effettuate mediante un Google Forms appositamente realizzato, i cui dati vengono esportati in un file in formato .csv. Sulla base delle informazioni contenute in tale file, lo script individua l'elemento segnalato ed evidenzia nel modello IFC importato in ambiente Blender-Bonsai l'oggetto interessato dalla problematica.

Tutti gli elementi presenti nell'ambiente monitorato, sia di natura tecnica (fan coil, corpi illuminanti, unità di climatizzazione, ecc.) sia di natura architettonica o artistica (capriate, serramenti, singole opere presenti negli ambienti, ecc.) sono contrassegnati da un identificativo univoco (ID). Questo consente di stabilire un collegamento diretto tra gli elementi fisici presenti nell'edificio e la loro controparte virtuale all'interno del modello IFC utilizzato dal Facility Manager.

Il personale addetto alla verifica dello stato dei luoghi, nel caso in cui venga rilevato un problema, ad esempio il guasto di un faretto LED, può segnalarlo tramite Google Forms. Lo script Python, che effettua una lettura continua del file aggiornato autonomamente a ogni segnalazione, individua l'elemento corrispondente all'interno del modello IFC e ne modifica la visualizzazione.

L'elemento segnalato viene colorato in funzione del livello di priorità indicato nel modulo di segnalazione. Non tutte le problematiche richiedono infatti lo stesso grado di urgenza: alcune situazioni possono richiedere un intervento programmato senza rappresentare un rischio immediato per la sicurezza o la fruibilità degli ambienti.

Nel caso della segnalazione di guasto mostrata precedentemente in Fig. 3.21, il mancato funzionamento di un punto luce non viene considerato un problema critico; l'indicazione di una priorità di livello 2 determina quindi la colorazione dell'elemento in giallo all'interno del modello. Oltre alla segnalazione visiva, nel pop-up informativo vengono riportati anche i commenti effettuati dall'utente che ha inviato la segnalazione e i relativi contatti, con la

possibilità di consultare eventuale documentazione fotografica caricata su piattaforma cloud e accessibile tramite link direttamente dal pop-up (Fig. 3.53).

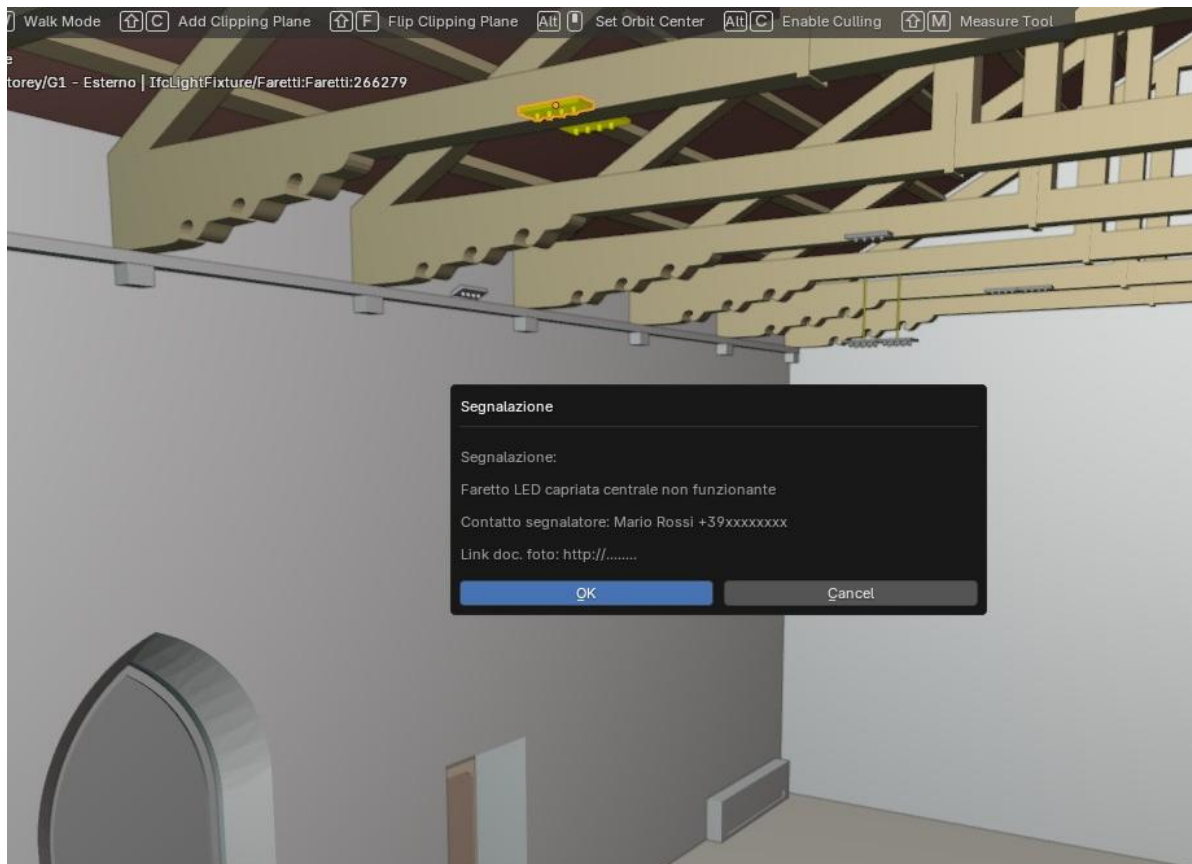


Fig. 3.53: Visualizzazione della segnalazione di guasto

Nel caso di problematiche più rilevanti, come ad esempio la fessurazione di un serramento con conseguenti infiltrazioni, la segnalazione viene invece classificata con un livello di priorità più elevato. In questi casi l'elemento viene evidenziato in rosso all'interno del modello, rendendo immediatamente percepibile la gravità della situazione e l'urgenza dell'intervento risolutivo.

Per quanto riguarda gli aspetti di Facility Management relativi al monitoraggio delle condizioni microclimatiche e alle segnalazioni dei guasti, la cartella di riferimento all'interno della repository GitHub della ricerca [182] è denominata "05_Case study HBIM - Gallerie Accademia Venezia".

3.2.4.3 Feedback utenti

In maniera analoga a quanto visto per il personale addetto alla manutenzione, è possibile fornire strumenti dedicati anche agli utenti che usufruiscono degli spazi monitorati, quali visitatori di sale museali e occupanti di edifici storici. Pur non possedendo competenze tecniche o manutentive specifiche, il loro contributo può risultare significativo per il monitoraggio complessivo delle condizioni ambientali e di comfort, fornendo segnalazioni e feedback utili alla gestione degli ambienti.

Nel caso studio analizzato relativo alle Gallerie dell'Accademia di Venezia, è stato sviluppato un sito in formato *.html* accessibile tramite dispositivi mobili mediante QR Code collocati nelle diverse sale del museo. L'interfaccia è stata progettata per risultare più semplice e intuitiva

rispetto a quella riservata ai tecnici manutentori, al fine di agevolare la compilazione anche da parte di utenti non specializzati (Fig. 3.54).

Le informazioni richieste riguardano diversi aspetti legati al comfort, tra cui la temperatura percepita, il tipo di vestiario, l'attività svolta, il livello di stress o la rumorosità degli ambienti, oltre alla possibilità di segnalare eventuali criticità ambientali (ad esempio ambienti percepiti come troppo rumorosi o scarsamente illuminati). Tali parametri risultano particolarmente rilevanti in quanto, nei modelli di calcolo del comfort termico, come quello di Fanger, essi vengono spesso assunti come costanti o stimati in maniera semplificata.

Una volta completato e inviato il sondaggio, realizzato tramite Google Forms, i dati vengono automaticamente raccolti in un foglio di calcolo condiviso. Successivamente, uno script Python provvede all'elaborazione delle informazioni raccolte, integrando i dati soggettivi forniti dagli utenti con quelli oggettivi rilevati dalla sensoristica IoT.

In particolare, i valori relativi al vestiario e all'attività metabolica vengono utilizzati per affinare il calcolo dell'indice PMV, consentendo una valutazione più aderente alle condizioni reali di utilizzo degli ambienti.

Nel caso in cui vengano raccolte più risposte relative allo stesso ambiente, lo script consente di elaborare i dati in forma aggregata, ad esempio calcolando un valore medio dei parametri di comfort percepito sulla base dei diversi questionari compilati. Il risultato di tale elaborazione può quindi essere associato allo spazio corrispondente nel modello IFC e visualizzato mediante una scala cromatica, rendendo immediatamente leggibile il livello di comfort percepito dagli utenti direttamente all'interno del modello informativo.

Questo ulteriore livello di informazione fornisce indicazioni puntuali sul comfort termico degli ambienti e contribuisce a orientare in modo più consapevole le modalità di gestione degli edifici, nel rispetto sia del benessere degli utenti sia delle esigenze di conservazione del patrimonio storico.

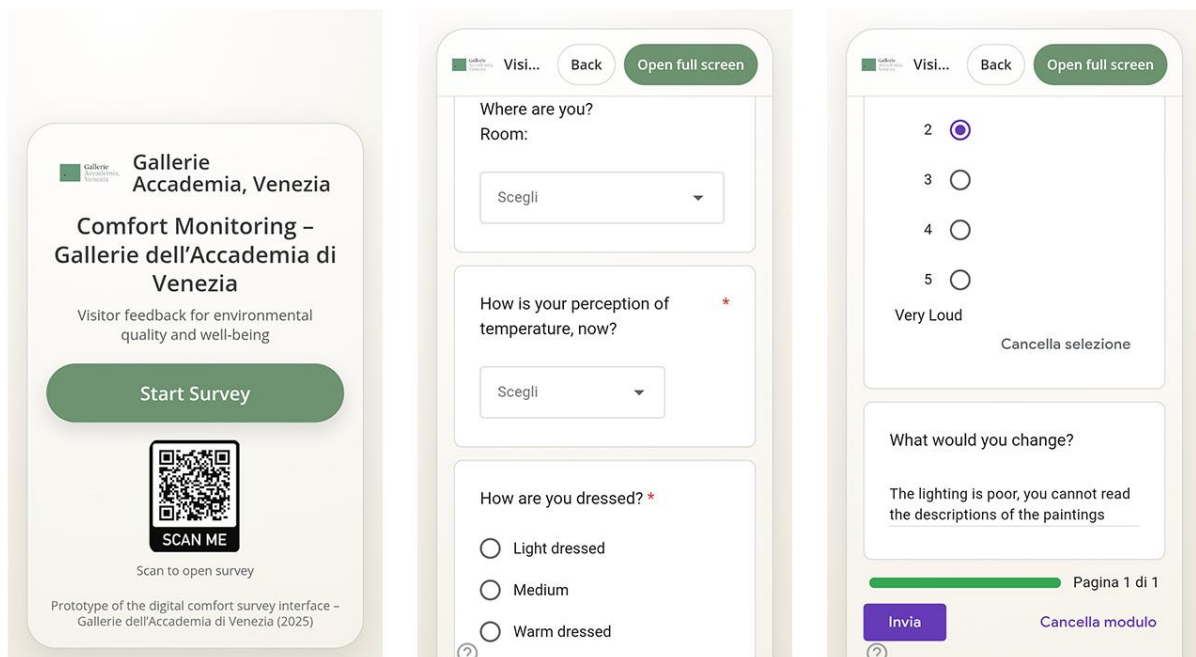


Fig. 3.54: Applicazione per la Comfort Survey

Grazie all'utilizzo combinato di sistemi open source e freeware, il Facility Manager ha così la possibilità di verificare lo stato degli ambienti attraverso il monitoraggio IoT, ricevere segnalazioni da parte dei manutentori in caso di guasti o anomalie, e acquisire feedback diretti dagli utenti in merito al comfort percepito.

I file *.html* utilizzati per la raccolta dei feedback sono resi disponibili nella repository GitHub del progetto relativa al comfort degli utenti [183].

Possibili sviluppi futuri potrebbero riguardare l'interfaccia con la quale vengono effettuate le segnalazioni, ad esempio attraverso l'integrazione in apposite applicazioni mobili delle planimetrie e dei singoli elementi dell'edificio consultabili direttamente all'interno dell'app. Ciò renderebbe ancora più intuitiva la segnalazione delle problematiche e consentirebbe una pianificazione più tempestiva delle strategie di intervento.

Un ulteriore sviluppo potrebbe riguardare l'implementazione della gestione dei ticket di manutenzione, mediante la realizzazione di una piattaforma online dedicata ai manutentori, che gli consenta di gestire e monitorare in maniera più efficace, all'interno di un unico ambiente di lavoro, lo stato degli interventi e le condizioni dei luoghi monitorati.

3.2.4.4 Analisi di fattibilità e compatibilità degli interventi

Nei paragrafi precedenti sono stati illustrati due aspetti cruciali per la gestione degli edifici: il monitoraggio continuo delle condizioni ambientali e la segnalazione di problematiche legate all'utilizzo e alla conservazione degli spazi, sia da parte dei tecnici specializzati nella manutenzione che da parte degli utenti finali che visitano o lavorano all'interno degli ambienti.

A livello gestionale, tali informazioni costituiscono la base conoscitiva per lo sviluppo di proposte migliorative mirate alla risoluzione delle criticità emerse.

Grazie alla creazione dei Property Set personalizzati descritti in precedenza (paragrafo 3.1.4.3), è possibile visualizzare nel modello BIM la fattibilità o meno del tipo di intervento ipotizzato. Ad esempio, qualora il monitoraggio evidenziasse temperature inferiori ai limiti minimi raccomandati per la corretta conservazione delle tele all'interno di un ambiente espositivo, e i feedback degli utenti confermino condizioni di discomfort termico in una determinata zona, si potrà ipotizzare come prima azione correttiva l'integrazione dell'impianto di riscaldamento, mediante l'aggiunta di un ulteriore fan coil.

A questo punto, l'analisi si concentra sulla valutazione della fattibilità dell'intervento, individuando la posizione ottimale e verificando la compatibilità con i vincoli architettonici e artistici propri dell'edificio storico, al fine di garantire il miglior equilibrio possibile tra esigenze di conservazione e comfort ambientale.

Come illustrato nel paragrafo 3.1.4.3, questa impostazione richiede preliminarmente un lavoro di:

- Catalogazione e schedulazione dei vincoli presenti nell'edificio;
- Associazione dei vincoli agli elementi del modello;
- Definizione di regole di verifica coerenti con il quadro normativo, gli obiettivi di conservazione e gli aspetti tecnici di realizzazione.

L'analisi di fattibilità e compatibilità degli interventi è stata quindi applicata operativamente al caso studio relativo alla Sala XXIII delle Gallerie dell'Accademia.

La scelta di adottare come caso studio un edificio museale di elevato valore storico-artistico quale le Gallerie dell'Accademia di Venezia risulta particolarmente significativa, in quanto rappresenta un contesto caratterizzato dalla compresenza di vincoli conservativi stringenti e di ambiti nei quali è possibile intervenire in modo controllato.

Da un lato sono presenti opere d'arte sensibili alle variazioni microclimatiche ed elementi decorativi di pregio che impongono criteri rigorosi di tutela; dall'altro, esistono porzioni dell'edificio nelle quali è consentita la realizzazione di interventi impiantistici, ad esempio mediante il passaggio di canalizzazioni o l'integrazione di nuovi sistemi tecnologici.

Tale configurazione rispecchia una condizione tipica degli interventi sugli edifici storici, nei quali coesistono aree soggette a forti limitazioni e zone nelle quali è possibile operare per l'adeguamento funzionale e impiantistico. Queste condizioni rendono il processo decisionale particolarmente delicato, richiedendo un equilibrio tra tutela del patrimonio, comfort degli utenti e requisiti tecnici, e costituiscono un banco di prova significativo per la verifica dell'efficacia del metodo proposto.

In una prima fase, è stato importato nel modello Revit delle Gallerie dell'Accademia il file .txt contenente i parametri condivisi con le proprietà viste nelle Tab. 3.2 e Tab. 3.3 e associati agli elementi corrispondenti, come ad esempio le proprietà "CutOut", "Perforation" e "DemolitionOfLayers" inerenti alle lavorazioni possibili sulle murature (realizzazione di tracce, perforazioni, rimozione delle stratigrafie), Fig. 3.55.

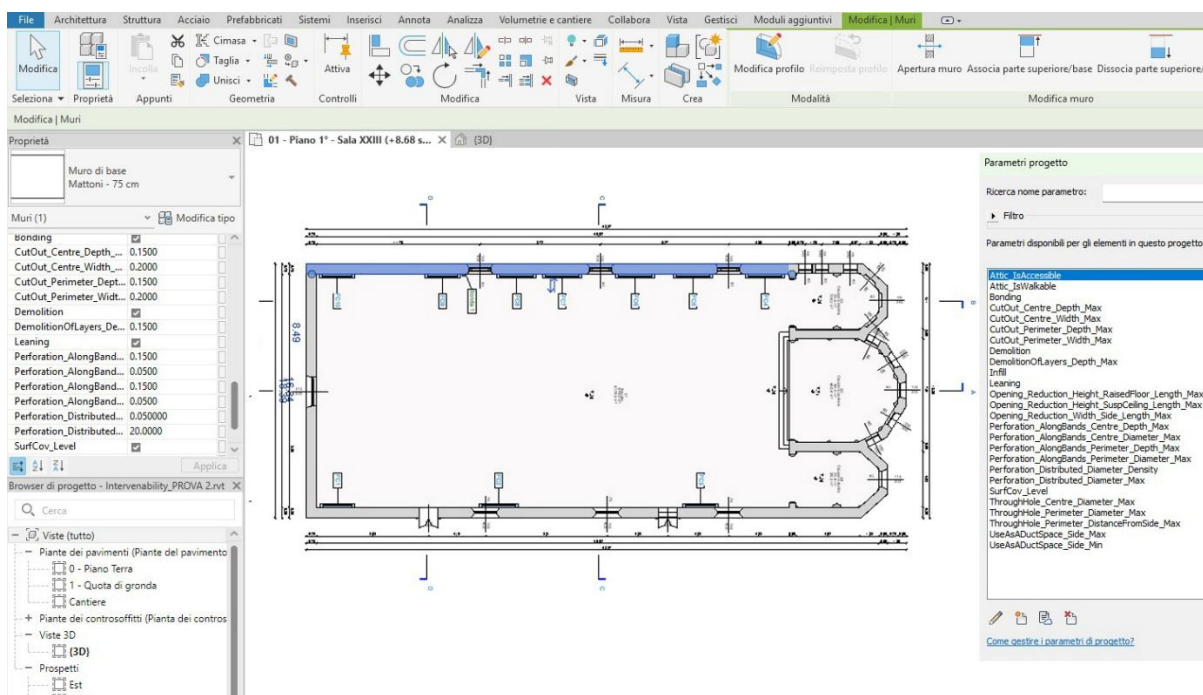


Fig. 3.55: Property Set per l'intervenibilità sui prospetti

Oltre alle murature, anche gli altri elementi potenzialmente soggetti a intervento, quali pavimenti, finestre, porte, soffitti e controsoffitti, sono stati dotati di specifici attributi relativi alle lavorazioni ammissibili, come ad esempio il ribassamento delle controsoffittature, il restringimento delle aperture per il passaggio degli impianti e le operazioni di perforazione o rivestimento superficiale.

I valori associati a tali operazioni sono stati espressi mediante parametri numerici: in metri per le grandezze dimensionali, e tramite codici (0-1-2-3) per indicare sia valori booleani (TRUE/FALSE) sia le zone di intervento sugli elementi selezionati (perimetrale, centrale, ecc.). La Tab. 3.4 riporta un estratto della codifica adottata:

Value	ThroughHole_Position	Perforation_Position	SurfCov_Level	Attic_IsAccessible	Attic_IsWalkable	AtticFloor_CanBeCovered	Bonding	Leaning	Demolition	Infill
0	NO	NO	NO	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
1	PERIMETER	PERIMETER	PARTIAL	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE
2	CENTER	CENTER	TOTAL							
3	ANY	ANY								

Tab. 3.4: Codifica degli interventi

Nel caso studio analizzato, ad eccezione dell'abside e della porzione superiore delle murature laterali caratterizzate dalla presenza di elementi decorativi di pregio, le murature risultano compatibili con interventi limitati quali forature e realizzazione di tracce per il passaggio degli impianti. Tali possibilità sono ulteriormente supportate dal fatto che, allo stato attuale, le murature presentano già canalizzazioni impiantistiche, che testimoniano precedenti interventi di integrazione tecnologica (Fig. 3.56).

Tuttavia, trattandosi di murature portanti, non sono ammesse operazioni eccessivamente invasive come la rimozione completa delle stratigrafie o la demolizione totale dell'elemento.



Fig. 3.56: Impianti tecnologici installati nelle murature

Inoltre, la possibilità di copertura delle superfici mediante la posa di pannelli isolanti è da escludere, in quanto incompatibile con le caratteristiche costruttive e con i vincoli di conservazione dell'edificio.

Una volta completata la definizione dei vincoli associati agli elementi del modello, è stato sviluppato in ambiente Dynamo uno script Python in grado di analizzare le informazioni

inserite dall'utente, metterle in relazione con i vincoli specifici delle diverse tipologie di lavorazione (Fig. 3.25) e attribuire a ciascun elemento un grado di intervenibilità.

L'esito di tale processo viene restituito in forma visiva mediante la colorazione degli elementi direttamente all'interno del modello BIM.

Ad esempio, una parete per la quale risulta ammissibile un intervento di demolizione viene contrassegnata con una colorazione verde, corrispondente a un livello di intervenibilità elevato. Viceversa, una parete soggetta a vincoli stringenti, per la quale non sono consentite lavorazioni invasive, viene rappresentata con una colorazione rossa, associata a un basso grado di intervenibilità, rendendo immediatamente leggibile l'incompatibilità dell'intervento con le esigenze di conservazione.

Per eseguire tale procedura è sufficiente che l'utente avvii lo script in ambiente Dynamo, consultabile, assieme agli altri materiali necessari alle analisi descritte, nella repository GitHub del progetto dedicata alla pianificazione degli interventi [184].

Lo script esegue automaticamente una serie di operazioni successive finalizzate alla classificazione e alla visualizzazione degli elementi del modello in base al grado di intervenibilità definito.

In particolare, il processo si articola in più fasi che conducono alla colorazione degli oggetti nel modello BIM secondo la scala cromatica precedentemente stabilita. Innanzitutto, lo script opera direttamente sul file Excel di base "InputData.xlsx", che contiene la scheda "CONSTRAINTS" precedentemente definita con i vincoli relativi alle diverse lavorazioni.

Durante questa fase viene generata una nuova scheda denominata "ELEMENTS_Dynamo", che viene automaticamente precompilata con i valori delle proprietà associate alle singole istanze presenti nel modello Revit (Fig. 3.57).

1	Code	Type	ThroughH	ThroughH	Opening_I	Opening_I	Perforatio	Perforatio	Perforatio	Perforatio	Perforatio	Perforatio	SurfCov_Lr	CutOut_De	CutOut_W	Attic_IsAc
2	51c8971a-259f-431f-8fa4-ebfe579281d3-0004a60d	Muri	0	1				0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	51c8971a-259f-431f-8fa4-ebfe579281d3-0004a7bf	Muri	0	1				0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	51c8971a-259f-431f-8fa4-ebfe579281d3-0004b3ce	Finestre			0	0	0									
5	5c70c617-43f4-40c9-bab6-c4f017eacbab-0003af1b	Finestre			0	0	0									
6	5edf92a8-7204-457b-8247-02928385a945-000444ea	Finestre			0	0	0									
7	60e6e20a-c26-4c4e-8946-3721b69375ef-0007776f	Finestre			0	0	0									
8	60e6e20a-c26-4c4e-8946-3721b69375ef-000777c4	Finestre			0	0	0									
9	6a7585bd-cdaf-45d6-8af8-836d8bdac0d-0002aa2f	Muri	1	0,08			0	0,03	1	0,12	0,1	1	0,1	0,1	0,1	
10	6a7585bd-cdaf-45d6-8af8-836d8bdac0d-0002aa66	Muri	1	0,08			0	0,02	1	0,12	0,1	0	0,15	0,15		
11	6a7585bd-cdaf-45d6-8af8-836d8bdac0d-0002aa2b	Muri	1	0,08			0	0,02	1	0,12	0,1	1	0,15	0,15		
12	6aeccfaf-68e5-40bf-b8f0-0b4878ff819d-0009d003	Muri	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	6aeccfaf-68e5-40bf-b8f0-0b4878ff819d-0009d004	Muri	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	6aeccfaf-68e5-40bf-b8f0-0b4878ff819d-0009d005	Muri	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	6aeccfaf-68e5-40bf-b8f0-0b4878ff819d-0009d006	Muri	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	765bf3f-3b4d-417b-aea2-b852743fcb1-0004c78f	Finestre			0	0	0									
17	765bf3f-3b4d-417b-aea2-b852743fcb1-0004c79e	Finestre			0	0	0									
18	765bf3f-3b4d-417b-aea2-b852743fcb1-0004c7ad	Finestre			0	0	0									
19	7779219a-c10c-410f-b74a-29cd992043a9-0005da18	Finestre			0	0	0									
20	7779219a-c10c-410f-b74a-29cd992043a9-0005e269	Finestre			0	0	0									
21	794c57c-2ffa-4128-8f27-65fa4628a29-0009f4f8	Muri	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	7a8df3e2-4d44-4ef1-b626-5a4fa21898bc-000463d2	Muri	3	0,08			0	0,02	1	0,12	0,1	0	0,13	0,13		
23	a3f08c91-f4cb-4956-a2f1-230ebcf7a4a3-000a618c	Finestre			0	0	0									
24	a3f08c91-f4cb-4956-a2f1-230ebcf7a4a3-000a6945	Finestre			0	0	0									
25	a3f08c91-f4cb-4956-a2f1-230ebcf7a4a3-000a694a	Finestre			0	0	0									
26	a3f08c91-f4cb-4956-a2f1-230ebcf7a4a3-000a6957	Finestre			0	0	0									
27	a3f08c91-f4cb-4956-a2f1-230ebcf7a4a3-000a6967	Finestre			0	0	0									
28	a3f08c91-f4cb-4956-a2f1-230ebcf7a4a3-000a8b1b	Muri	0	1			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	ac276bb6-a9fb-4f2b-830f-4681b5f58b6-00031816	Porte			0	0	0									
30	b0175c60-9ec1-4f71-a74d-a567a78b32f-0009bac9	Muri	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	b0175c60-9ec1-4f71-a74d-a567a78b32f-0009baca	Muri	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	b0175c60-9ec1-4f71-a74d-a567a78b32f-0009bacb	Muri	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	b0175c60-9ec1-4f71-a74d-a567a78b32f-0009bacc	Muri	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	b0175c60-9ec1-4f71-a74d-a567a78b32f-0009badc	Muri	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	b0175c60-9ec1-4f71-a74d-a567a78b32f-0009bace	Muri	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	b3f040a3-d3e5-45ed-ab0e3-8ad4a3297e23-00057f5a	Muri	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	b9448885-3784-45ad-bba2-6924c1648550-0004c58b	Finestre			0	0	0									

Fig. 3.57: Scheda Elements generata mediante Dynamo

Questa configurazione, che prevede la creazione della scheda "ELEMENTS_Dynamo" affiancata alla scheda nativa "ELEMENTS" in Excel vista in precedenza al paragrafo 3.1.4.3, consente di operare parallelamente sia in ambiente Excel sia in ambiente Dynamo. A fini di

ricerca, si è scelto di mantenere entrambe le modalità operative, in modo da consentire un controllo incrociato della validità del metodo e permettere l’inserimento e la gestione dei dati sia tramite fogli di calcolo sia direttamente attraverso Dynamo.

Successivamente, Dynamo avvia uno script Python esterno (Intervenability_01.py) che si occupa dell’analisi automatica dei vincoli e della verifica di compatibilità tra le richieste di intervento e le caratteristiche degli elementi del modello.

Lo script legge i dati contenuti nel file Excel “InputData.xlsx”, in particolare le schede “QUERIES”, “ELEMENTS_Dynamo”, “CONSTRAINTS” e “SETTINGS” e, per ciascuna richiesta di intervento, valuta la fattibilità delle diverse lavorazioni sugli elementi edilizi presenti nel modello.

Tale valutazione avviene confrontando i parametri associati agli elementi (ad esempio tipologia, posizione, accessibilità, presenza di decorazioni) con le regole definite nella tabella dei vincoli.

Per ogni elemento viene quindi determinato un livello di compatibilità dell’intervento, espresso tramite un valore numerico associato al grado di invasività della lavorazione ammessa.

A partire da tale valore, lo script assegna una codifica cromatica agli elementi, generando una rappresentazione visiva immediata delle possibilità di intervento direttamente nel modello BIM.

I risultati dell’analisi vengono infine esportati in un file Excel di output (Intervenability_RESULTS.xlsx), contenente una sintesi delle valutazioni effettuate e il dettaglio delle lavorazioni ammissibili per ciascun elemento, a supporto delle successive fasi di progettazione e pianificazione degli interventi.

La Fig. 3.58 illustra il risultato del processo di valutazione, per ogni elemento viene verificata la fattibilità o meno delle varie lavorazioni, ciò determina un grado di invasività che ne determinerà il grado di vincolo. In questo caso, non è possibile effettuare nessun tipo di intervento (IsFeasible=FALSO) per cui il grado di vincolo sarà il più alto (Invasivity=12).

nQuery	Code	InterventionName	IsFeasible	Invasivity
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Scavo	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Demolizione	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Demolizione di strati	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Posa – In controsoffittatura	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Posa – In controparete	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Isolamento – Lato interno – Su soffitto	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Isolamento – Lato interno – Su parete	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Isolamento – A cappotto	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Posa – In traccia - Tubi	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Posa – In traccia - Cavi	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Posa - Aggancio - Tubi	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Posa - Aggancio - Cavi	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Posa - Aggancio - Condotti	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Installazione di terminali d’impianto	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Passaggio con foro - Tubi	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Passaggio con foro - Cavi	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Passaggio con foro - Condotti	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Isolamento - Insufflaggio	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Passaggio per restringimento finestra/porta – Controsoffittatura/Pavimento rialzato - Tubi	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Passaggio per restringimento finestra/porta – Controsoffittatura/Pavimento rialzato - Cavi	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Passaggio per restringimento finestra/porta – Controsoffittatura/Pavimento rialzato - Condotti	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Appoggio	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Tamponamento (porte/finestre)	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Riutilizzo come cavedio	FALSO	12
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Isolamento – In sottotetto	FALSO	12

Fig. 3.58: Elenco della fattibilità degli interventi per singolo elemento

Questa verifica viene applicata a tutti gli elementi del modello; il risultato dell’elaborazione (Fig. 3.59) è una tabella di sintesi che riporta, per ciascun elemento, il grado di intervenibilità

calcolato e la relativa codifica cromatica associata, successivamente utilizzata in ambiente Dynamo.

nQuery	Code	Type	Intervenability	FeasibleCount	ColourHex	R	G	B
1	0011bbf1-5035-4a90-8453-8b84c937982e-0009f3e5	Controsoffitti	12	0	#7a0402	122	4	2
1	0c10b0b3-52a2-4405-954b-8e718441005e-0004b826	Finestre	2	1	#74fe5c	116	254	92
1	160afe49-8c3f-4260-bd31-f6d219ca5a57-000395ea	Finestre	12	0	#7a0402	122	4	2
1	160afe49-8c3f-4260-bd31-f6d219ca5a57-00039664	Finestre	12	0	#7a0402	122	4	2
1	1d5eda9e-47d9-404d-ae8b-b1e779726e6d-0009864c	Muri	12	0	#7a0402	122	4	2
1	1d5eda9e-47d9-404d-ae8b-b1e779726e6d-0009864d	Muri	12	0	#7a0402	122	4	2
1	1d5eda9e-47d9-404d-ae8b-b1e779726e6d-0009864e	Muri	12	0	#7a0402	122	4	2
1	1d5eda9e-47d9-404d-ae8b-b1e779726e6d-0009864f	Muri	12	0	#7a0402	122	4	2
1	1d5eda9e-47d9-404d-ae8b-b1e779726e6d-00098650	Muri	12	0	#7a0402	122	4	2
1	1d5eda9e-47d9-404d-ae8b-b1e779726e6d-00098651	Muri	12	0	#7a0402	122	4	2
1	1d5eda9e-47d9-404d-ae8b-b1e779726e6d-00098652	Muri	12	0	#7a0402	122	4	2
1	1d5eda9e-47d9-404d-ae8b-b1e779726e6d-00098653	Muri	12	0	#7a0402	122	4	2
1	1d5eda9e-47d9-404d-ae8b-b1e779726e6d-00098654	Muri	12	0	#7a0402	122	4	2
1	1d5eda9e-47d9-404d-ae8b-b1e779726e6d-00098655	Muri	12	0	#7a0402	122	4	2
1	1d5eda9e-47d9-404d-ae8b-b1e779726e6d-00098656	Muri	12	0	#7a0402	122	4	2
1	1d5eda9e-47d9-404d-ae8b-b1e779726e6d-00098657	Muri	12	0	#7a0402	122	4	2
1	1f491f8b-2d6a-4f36-abf5-0ebbe5005227-000a6007	Muri	12	0	#7a0402	122	4	2
1	1f491f8b-2d6a-4f36-abf5-0ebbe5005227-000a6044	Finestre	12	0	#7a0402	122	4	2
1	20add419-8a1d-4ca1-9bcf-25de992ef970-0003a40e	Finestre	12	0	#7a0402	122	4	2
1	20add419-8a1d-4ca1-9bcf-25de992ef970-0003a475	Finestre	12	0	#7a0402	122	4	2
1	227cc853-4076-44d5-9bfb-d5c03b1c35fa-000339dc	Pavimenti	12	0	#7a0402	122	4	2

Fig. 3.59: Sintesi dell'intervenibilità degli elementi del modello

A questo punto, lo script Dynamo legge per ogni elemento il codice identificativo e il valore di invasività corrispondente all'intervento ammesso e applica automaticamente la colorazione direttamente nel modello BIM, secondo la scala cromatica definita.

Il sistema risulta completamente dinamico: a ogni modifica dei parametri di invasività è sufficiente rilanciare lo script per aggiornare automaticamente l'intero modello, senza la necessità di eseguire ulteriori procedure manuali. L'intero processo è gestito tramite un'unica operazione (Fig. 3.60).

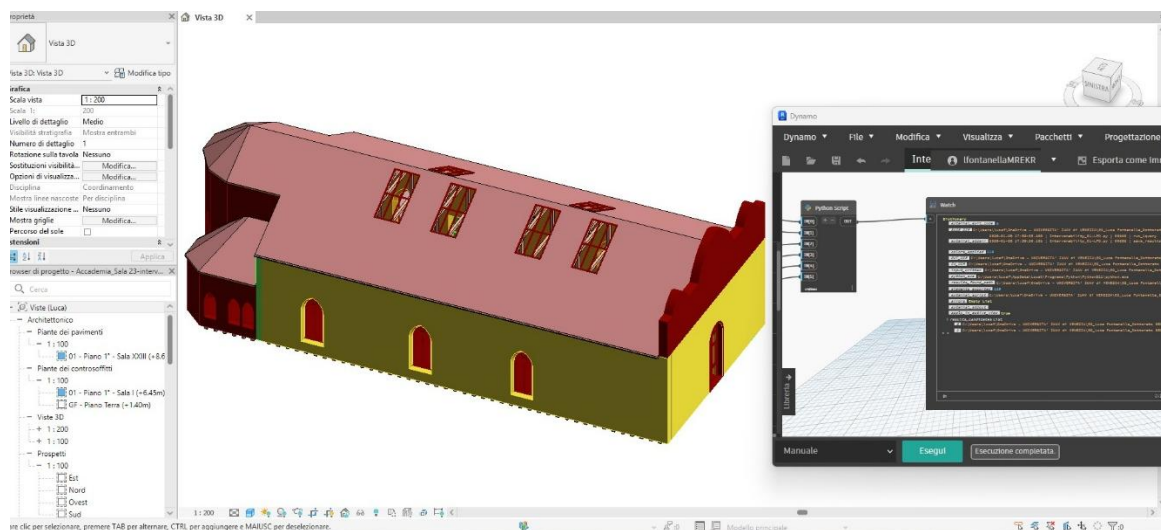


Fig. 3.60: Colorazione del modello in base ai livelli di intervenibilità

Il modello, ispezionabile e arricchito delle informazioni relative alle lavorazioni ammissibili, consente una lettura immediata delle possibilità di intervento sulle diverse parti dell'edificio. In Fig. 3.61 è riportato, a titolo di esempio, il settore della sala XXIII comprendente le tre absidi, nelle quali le volte, finestre e costoloni risultano non modificabili in quanto caratterizzati da elevato valore storico-architettonico, oltre che strutturale.

Le restanti porzioni murarie, prive di particolare valenza storico-artistica e rappresentate in colore giallo, risultano invece potenzialmente interessabili da interventi impiantistici, presentando già allo stato attuale cavedi e passaggi per le reti tecnologiche.



Fig. 3.61: Livelli di intervenibilità nella zona absidale

L'approccio descritto, schematizzato in Fig. 3.62 (nei riquadri evidenziati in giallo sono indicate le operazioni richieste all'utente), dimostra come la definizione dei vincoli di intervento all'interno di una modalità di visualizzazione dati esplicita e interrogabile consenta di superare una valutazione puramente qualitativa, traducendo criteri normativi e tecnici in un processo decisionale strutturato, condiviso con funzionari e tecnici preposti alla conservazione dei beni storici, e facilmente verificabile in fase di pianificazione degli interventi.

La visualizzazione dei risultati, restituita mediante una codifica cromatica basata sul livello di invasività dell'intervento, rappresenta un efficace strumento di supporto alle decisioni, in grado di sintetizzare informazioni complesse direttamente all'interno del modello BIM.

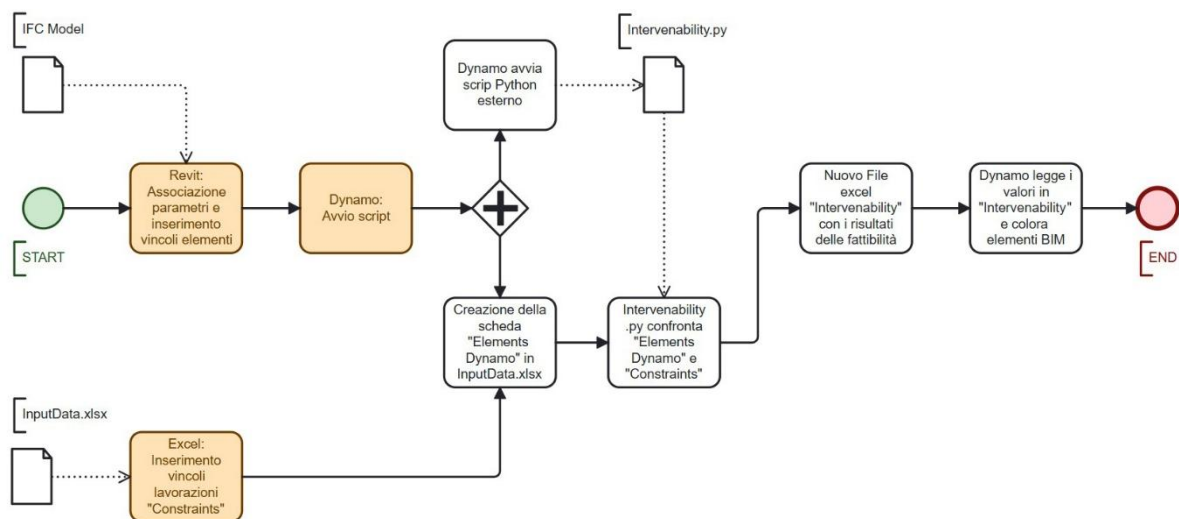


Fig. 3.62: Workflow per la visualizzazione dei vincoli direttamente nei modelli BIM

Sebbene nella presente configurazione la restituzione grafica avvenga tramite override in ambiente Revit, il workflow proposto risulta intrinsecamente indipendente dalla piattaforma di authoring, poiché fondato su formati aperti e freeware (IFC, fogli di calcolo Excel, programmazione a blocchi Dynamo) oltre che su script di elaborazione dati tramite Python.

In quest'ottica, futuri sviluppi potrebbero prevedere la completa migrazione della fase di visualizzazione verso ambienti open source, ad esempio mediante l'utilizzo di Blender-Bonsai, consentendo di eliminare la dipendenza da software proprietari e rafforzando ulteriormente la coerenza del metodo con i principi dell'openBIM.

Un possibile workflow orientato verso l'open source è rappresentato in Fig. 3.63. In questa configurazione la visualizzazione dei risultati sulle analisi dei vincoli presenti nell'edificio è demandata a Blender-Bonsai, mentre tutte le elaborazioni avvengono mediante script Python, utilizzando nello specifico la libreria IfcOpenShell in grado di operare direttamente all'interno dello schema IFC.

In una prima fase, l'idoneità del modello IFC viene verificata mediante il controllo della presenza al suo interno di tutte le proprietà viste in Tab. 3.2 e Tab. 3.3, grazie alla configurazione di un apposito file IDS.

Tali proprietà, la cui condivisione è resa possibile grazie alla loro pubblicazione sotto forma di dizionari bSDD, vengono quindi lette dallo script Python e riportate all'interno del file "InputData.xlsx", creando al suo interno una nuova scheda denominata *IfcOS*, analogamente a quanto precedentemente illustrato mediante Dynamo.

Anche in questa configurazione il file "InputData.xlsx" rappresenta un input esterno nel quale l'operatore addetto alle manutenzioni inserirà i vincoli (scheda "CONSTRAINTS") propri delle singole lavorazioni, indipendenti quindi dallo specifico edificio analizzato.

Lo script procede quindi al confronto tra i vincoli associati agli elementi del modello IFC e quelli definiti nel file "InputData.xlsx", generando un file di output denominato "Intervenability.xlsx", contenente l'esito delle verifiche di fattibilità.

La procedura si conclude con la lettura dei risultati da parte dello script Python e con l'applicazione automatica della codifica cromatica agli elementi IFC direttamente nell'ambiente Blender-Bonsai.

A differenza della configurazione precedentemente descritta, tutte le operazioni risultano svincolate da software di authoring proprietari come Revit, poiché gestite mediante script Python e strumenti open source.

L'utilizzo di fogli di calcolo commerciali, come Excel, è da intendersi esclusivamente come interfaccia di input/output dei dati e non come vincolo strutturale del metodo, risultando pertanto sostituibile con soluzioni open source equivalenti.

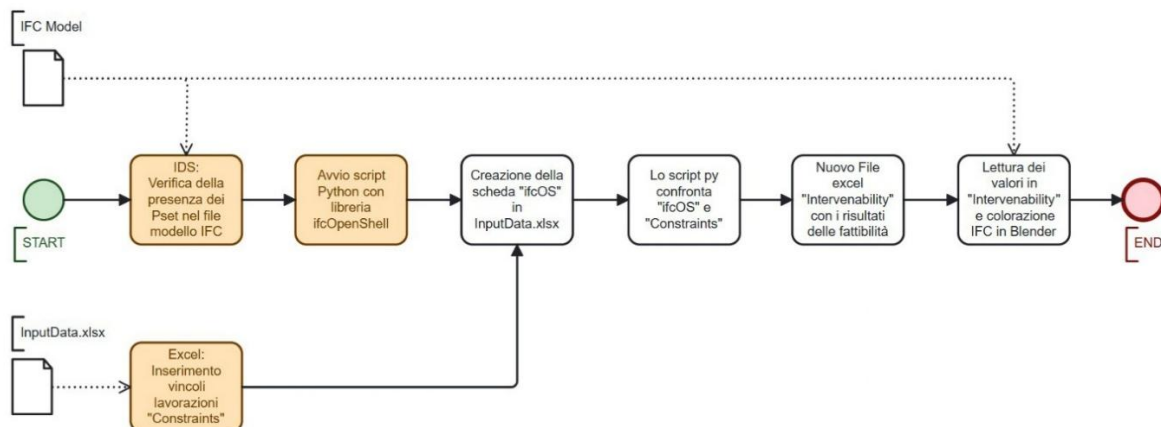


Fig. 3.63: Workflow open source per la visualizzazione dei vincoli

Ulteriori sviluppi futuri potrebbero riguardare la realizzazione di una piattaforma dedicata alla formalizzazione e alla gestione dei vincoli di intervento dell'edificio analizzato, in grado di consentire l'inserimento strutturato delle regole direttamente da parte degli operatori coinvolti nel processo decisionale.

In tale prospettiva, l'approccio illustrato nel presente paragrafo non si configura come uno strumento di automatizzazione delle scelte progettuali, bensì come un supporto alla valutazione di fattibilità e compatibilità degli interventi.

La traduzione dei vincoli normativi, tecnici e conservativi in regole esplicite e interrogabili consente infatti di rendere trasparente il processo decisionale, facilitando il confronto tra le diverse figure coinvolte e permettendo una verifica puntuale delle condizioni che rendono un intervento ammissibile o meno.

Questo aspetto risulta particolarmente rilevante nel contesto dell'edilizia storica, nel quale le decisioni non possono basarsi esclusivamente su criteri prestazionali, ma devono tenere conto di parametri qualitativi quali il grado di invasività, la reversibilità delle azioni e la compatibilità con i vincoli storico-artistici.

La possibilità di visualizzare tali condizioni direttamente all'interno del modello informativo contribuisce a fornire un quadro strutturato a supporto della pianificazione degli interventi.

L'approccio descritto costituisce pertanto un primo passo verso l'utilizzo del modello HBIM come strumento di supporto alle decisioni, capace di integrare dati di monitoraggio, conoscenza del costruito e vincoli di intervento, senza sostituirsi al ruolo critico del progettista e degli enti preposti alla tutela, ma creando un ambiente di supporto e di condivisione delle informazioni tra i diversi attori coinvolti nel processo decisionale.

4 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

L'adozione della metodologia BIM nel settore delle costruzioni comporta vantaggi concreti in termini di gestione delle informazioni, ottimizzazione dei processi e collaborazione tra le diverse figure coinvolte, in particolare quando viene applicata lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio.

I benefici rispetto a una modalità di progettazione tradizionale basata su strumenti CAD risultano particolarmente evidenti nelle fasi iniziali del processo progettuale. In tali fasi, infatti, a fronte di uno sforzo iniziale maggiore per la modellazione e la realizzazione degli elaborati di progetto, il costo delle modifiche risulta significativamente inferiore rispetto a quello che si avrebbe nelle fasi successive del ciclo edilizio (Fig. 4.1).

Si pensi, ad esempio, alle modifiche che devono essere apportate in fase di cantiere a seguito di interferenze non individuate durante la pianificazione degli interventi. Uno dei principali punti di forza della metodologia BIM consiste proprio nella possibilità di anticipare questo tipo di criticità, grazie alla collaborazione costante tra i diversi attori coinvolti nel processo edilizio e alla condivisione di un modello informativo comune.

Come evidenziato dalla Curva di McLeamy riportata di seguito, l'analisi delle diverse fasi del processo edilizio mostra come i benefici derivanti dall'adozione del BIM risultino massimi quando la metodologia viene applicata sin dalle prime fasi di progettazione.

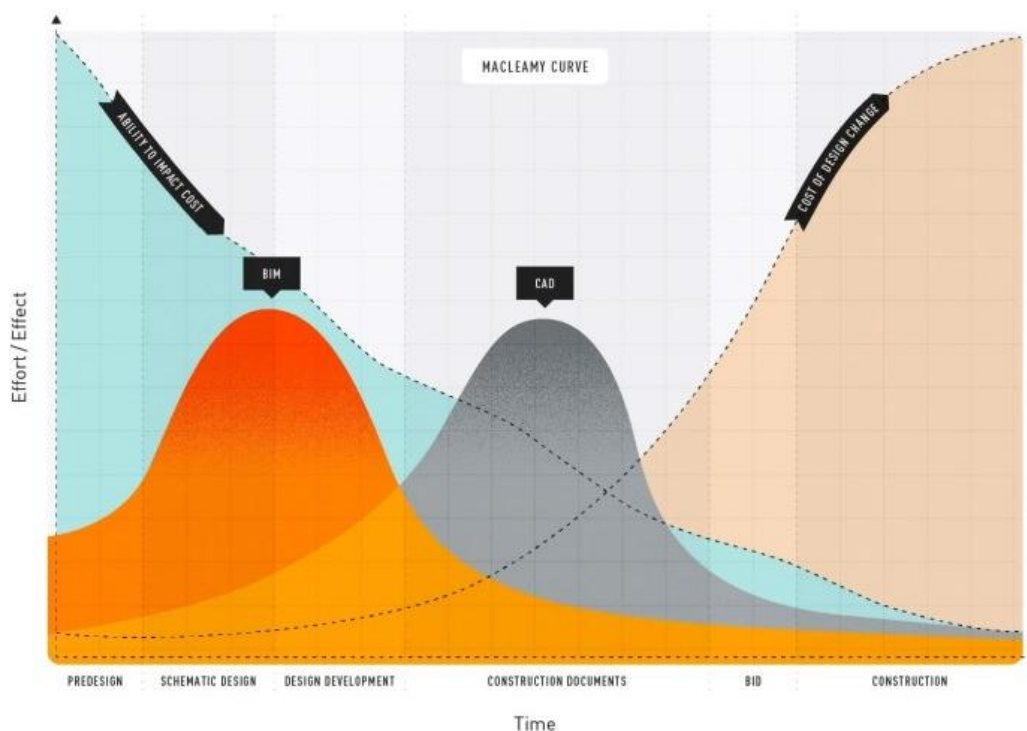


Fig. 4.1: Curva di McLeamy (fonte: www.vectorworks.net)

Sebbene l'introduzione delle diverse dimensioni del BIM miri ad ampliarne l'utilizzo anche nelle fasi successive del ciclo di vita dell'edificio, è possibile affermare che i vantaggi più immediati e tangibili si manifestano proprio nelle fasi iniziali del processo progettuale.

Nel caso del patrimonio storico, tuttavia, tale dinamica risulta differente, poiché si opera su edifici già realizzati per i quali le informazioni disponibili risultano frequentemente incomplete o frammentarie.

Nel contesto dell'Heritage, dove la fase di costruzione è già stata completata e le informazioni disponibili sull'edificio risultano spesso parziali, eterogenee o caratterizzate da elevati livelli di incertezza, l'utilizzo esclusivo del BIM può risultare meno vantaggioso, poiché non è possibile sfruttarne pienamente i benefici lungo tutto il ciclo di vita dell'opera.

In tali contesti risulta quindi più efficace utilizzare il BIM in combinazione con altre tecnologie digitali, tra cui l'Internet of Things (IoT), a supporto delle attività di gestione e manutenzione dell'edificio. L'integrazione tra modelli informativi e sistemi di monitoraggio consente infatti di raccogliere dati in tempo reale sul funzionamento degli impianti e sulle condizioni ambientali degli spazi, rendendo possibile, ad esempio, il controllo remoto dell'illuminazione, la gestione delle condizioni microclimatiche o il monitoraggio dello stato di apertura di serramenti e accessi.

In questo scenario, la fase gestionale assume un ruolo ancora più rilevante rispetto a quanto avviene negli edifici di nuova costruzione, nei quali il BIM viene generalmente introdotto sin dalle prime fasi progettuali.

Il presente lavoro si è pertanto concentrato sugli aspetti legati al monitoraggio e alla gestione degli edifici, con particolare riferimento al patrimonio storico costruito, analizzando le tecnologie in grado di supportare l'osservazione delle prestazioni ambientali e fornendo strumenti utili al Facility Manager per il controllo delle condizioni operative e per la pianificazione di interventi correttivi in presenza di criticità.

Nei capitoli precedenti sono state sviluppate e testate diverse modalità di integrazione tra modelli informativi, sistemi di monitoraggio IoT e database di dati ambientali, evidenziando la possibilità di utilizzare il modello HBIM non solo come strumento di rappresentazione e archiviazione delle informazioni, ma anche come ambiente operativo per la visualizzazione e l'interpretazione dei dati relativi al comportamento dell'edificio.

A partire da queste considerazioni, nei paragrafi seguenti vengono analizzati in modo critico i risultati ottenuti, mettendo in evidenza le differenze concettuali tra BIM e HBIM, i limiti degli attuali strumenti di modellazione informativa nel contesto del patrimonio storico e le potenzialità dell'approccio sviluppato nei casi studio esaminati.

4.1 Differenze concettuali e operative tra BIM e HBIM

Nella prima fase della ricerca è stata condotta un'analisi volta a individuare le principali differenze e i limiti emergenti dall'applicazione della metodologia proposta in ambito HBIM rispetto al contesto degli edifici di più recente costruzione. Sebbene il concetto che sta alla base della metodologia BIM sia applicabile a qualsiasi tipologia edilizia, è possibile affermare che il patrimonio storico presenta peculiarità specifiche che ne condizionano fortemente l'impiego, sia in termini di modellazione sia nelle modalità di pianificazione degli interventi manutentivi e delle attività di gestione.

Gli edifici storici sono infatti caratterizzati dalla presenza di vincoli di natura conservativa, da una conoscenza spesso limitata delle stratigrafie e delle tecnologie costruttive, dalla necessità

di adottare interventi reversibili e a bassa invasività, nonché dalla presenza di apparati decorativi e opere d'arte sensibili alle variazioni microclimatiche. Tali condizioni rendono necessario introdurre nel processo decisionale parametri aggiuntivi che generalmente non risultano presenti nel contesto dell'edilizia di nuova realizzazione.

Tra questi rientrano, ad esempio, il grado di invasività degli interventi di miglioramento termico ed energetico, la loro reversibilità, la compatibilità con i vincoli storico-artistici e l'individuazione di aree nelle quali sia possibile effettuare indagini conoscitive sulle strutture dell'edificio senza comprometterne l'integrità.

Negli edifici di nuova costruzione, al contrario, le strategie di intervento e di gestione possono essere pianificate prevalentemente sulla base di criteri prestazionali ed energetici, facendo riferimento a materiali e tecniche costruttive note, oltre che a modelli di comportamento termo-energetico consolidati. In tali contesti, il processo decisionale risulta maggiormente orientato all'ottimizzazione delle prestazioni e dei consumi, con un livello di incertezza significativamente inferiore.

La Tab. 4.1, riportata di seguito, sintetizza il confronto tra edifici di nuova costruzione e patrimonio storico, evidenziando i principali parametri distintivi, i limiti operativi e le specificità proprie dell'approccio HBIM rispetto a quello standard applicato ai nuovi interventi.

Aspetto analizzato	Edifici di nuova costruzione (BIM)	Edifici storici (HBIM)
Conoscenza delle stratigrafie e delle tecniche costruttive.	Completa e definita in fase progettuale.	Spesso incompleta o dedotta tramite ricerche documentali e indagini invasive concordate con le soprintendenze preposte.
Affidabilità dei modelli termici ed energetici.	Elevata, basata su dati certi.	Condizionata da incertezze costruttive e materiche.
Pianificazione interventi migliorativi.	Non necessaria.	Subordinata ai vincoli presenti.
Integrazione dei sensori IoT.	Pianificabile in fase progettuale.	Limitata da vincoli storico-artistici e strutturali.
Ruolo del monitoraggio IoT.	Incentrato sulla gestione e manutenzione.	Priorità sulla conservazione dei manufatti storici e dei beni ivi contenuti.
Parametri decisionali.	Principalmente quantitativi (prestazioni, consumi, ecc.).	Quantitativi e qualitativi (vincoli, compatibilità, tutela).
Vincoli normativi e conservativi.	Prevalentemente normativi e prestazionali (energia, sicurezza, comfort).	Vincoli storico-artistici e prescrizioni delle soprintendenze.
Ruolo del Facility Manager.	Gestione tecnica e ottimizzazione energetica.	Mediazione tra esigenze di conservazione, ottimizzazione energetica, comfort e gestione.
Coinvolgimento degli utenti (Survey).	Incentrato sulla valutazione del comfort.	Utile anche per individuare situazioni di rischio per opere e ambienti.
Replicabilità delle procedure.	Facilmente standardizzabile.	L'unicità dei singoli casi comporta un alto livello di personalizzazione delle procedure.

Tab. 4.1: Confronto tra approccio BIM ed HBIM

Il confronto evidenziato in Tab. 4.1 mostra come l'applicazione della metodologia BIM al patrimonio storico non possa essere considerata una semplice estensione delle pratiche consolidate per gli edifici di nuova costruzione.

Le differenze riscontrate non sono infatti esclusivamente di natura tecnica, ma riflettono una diversa impostazione concettuale del processo decisionale.

Nel caso degli edifici di nuova costruzione, il modello informativo BIM si configura come uno strumento prevalentemente predittivo, orientato all'ottimizzazione delle prestazioni energetiche, funzionali ed economiche sulla base di dati certi e definiti già in fase progettuale. Al contrario, nell'ambito HBIM il modello assume un ruolo prevalentemente descrittivo e diagnostico, finalizzato alla comprensione dello stato di fatto, alla gestione del rischio e al supporto delle attività di monitoraggio, conservazione e manutenzione del patrimonio costruito.

4.2 Limiti dell'attuale modellazione informativa nel contesto HBIM

Un limite emerso nel corso della ricerca riguarda la capacità degli attuali modelli informativi di rappresentare in modo adeguato gli elementi che li costituiscono, in particolare nell'ottica delle analisi termiche, delle attività di monitoraggio e della conseguente pianificazione degli interventi migliorativi.

Nel contesto BIM, infatti, gli elementi costruttivi quali, ad esempio, muri, solai e coperture, sebbene abbiano stratigrafie definite in termini di spessori e materiali, vengono generalmente modellati come entità unitarie. Tale rappresentazione risulta spesso insufficiente, soprattutto nel caso di analisi riferite agli edifici storici, nei quali le possibilità di intervento non sono omogenee sull'intero elemento, ma variano localmente in funzione della presenza di apparati decorativi, vincoli conservativi o limitazioni di altra natura.

Ad esempio, il medesimo elemento murario può presentare porzioni sulle quali è consentito intervenire, mediante l'applicazione di una controparete isolata, affiancate da aree sottoposte a vincoli stringenti, come nel caso di superfici affrescate o decorate.

Analogamente, può risultare ammissibile la rimozione o il rifacimento di uno strato di intonaco sul lato interno di una parete, mentre tale intervento risulta precluso sul lato esterno. L'attuale modellazione informativa non consente di rappresentare in modo dettagliato tali differenze, poiché l'elemento murario viene trattato come un'entità indivisibile dal punto di vista semantico e gestionale.

Questa problematica si riflette anche nelle analisi termiche degli edifici, in particolare nell'individuazione degli elementi opachi soggetti a verifica dei limiti di trasmittanza termica. Come avviene frequentemente per gli elementi murari, questi risultano spesso comuni a più locali, alcuni dei quali possono presentare caratteristiche tali da rendere necessaria la verifica puntuale delle prestazioni termiche, mentre lo stesso elemento, analizzato in relazione ad altri ambienti, può risultare esente dalla medesima verifica.

Un caso tipico è rappresentato da una muratura perimetrale condivisa tra locali riscaldati e locali non riscaldati.

Queste condizioni evidenziano come un'analisi basata su elementi costruttivi unitari risulti spesso insufficiente a descrivere scenari decisionali complessi.

Nel contesto del patrimonio storico, tali limitazioni assumono una rilevanza ancora maggiore, poiché le strategie di conservazione e manutenzione possono differire in modo sostanziale tra le superfici interne ed esterne di uno stesso elemento costruttivo.

L'impossibilità di associare in modo strutturato informazioni differenti alle due superfici degli elementi limita di fatto la capacità del modello informativo di supportare decisioni più puntuali e consapevoli.

Nel presente lavoro, tali limiti non sono stati interpretati come criticità da risolvere definitivamente, bensì come condizioni strutturali da rendere esplicite all'interno del processo decisionale, cercando al contempo strategie alternative per mitigarne gli effetti.

In questo senso, l'integrazione del modello informativo con sistemi di monitoraggio IoT e con strumenti di visualizzazione dei vincoli architettonici consente di supportare il Facility Manager nella valutazione delle possibili azioni, pur in assenza di una rappresentazione completamente granulare degli elementi costruttivi.

Questo aspetto evidenzia come, nel contesto del patrimonio storico, il modello informativo non possa essere considerato esclusivamente come una rappresentazione geometrica e informativa dell'edificio, ma debba essere interpretato come uno strumento di supporto al processo decisionale, nel quale la modellazione, il monitoraggio e l'analisi dei vincoli concorrono congiuntamente alla definizione delle strategie di intervento.

4.3 Analisi critica dell'approccio proposto in relazione ai casi studio

Una volta identificati i principali limiti concettuali e rappresentativi dell'attuale modellazione informativa in ambito HBIM, la ricerca si è concentrata sulla valutazione critica degli strumenti attualmente disponibili e sull'analisi dei risultati ottenuti attraverso l'applicazione dell'approccio proposto ai casi studio analizzati.

L'analisi dei software disponibili sul mercato per il monitoraggio delle prestazioni degli edifici ha consentito di ottenere una visione complessiva dello stato dell'arte relativo alla gestione energetica e ambientale mediante sistemi IoT. In una fase successiva, si è proceduto alla riproduzione di un workflow analogo utilizzando esclusivamente tecnologie open source e freeware, ampliandone le funzionalità e approfondendo le potenzialità offerte da strumenti di programmazione liberi e personalizzabili.

L'applicazione di tale approccio ha dimostrato l'efficacia dell'utilizzo congiunto delle metodologie openBIM, software open source e strumenti freeware per la rappresentazione in tempo reale degli stream di dati IoT all'interno dei modelli BIM.

I casi studio analizzati, utilizzati come banco di prova per testare l'efficacia dei sistemi proposti, hanno evidenziato come sia possibile, una volta configurata un'adeguata architettura IoT, gestire in tempo reale edifici caratterizzati da elevata complessità sia in termini di quantità di dati da elaborare sia in relazione alla presenza di numerosi vincoli architettonici, come avviene frequentemente nel patrimonio storico-culturale.

La flessibilità garantita da strumenti come il linguaggio di programmazione Python consente infatti sia la lettura di stream di dati archiviati in database SQL sia la loro elaborazione sulla base di specifiche query realizzate mediante fogli di calcolo, come nel caso dell'utilizzo di Microsoft Excel. Questo approccio favorisce un'interazione continua tra dataset e modello informativo.

Un ulteriore vantaggio è rappresentato dalla capacità di associare tali dati a un modello IFC attraverso strumenti come Bonsai, add-on open source di Blender, che consente di stabilire

un dialogo senza soluzione di continuità tra modelli informativi e flussi di dati provenienti dai sensori IoT. In questo modo è possibile garantire un controllo costante dei dati rilevati e confrontarli con i parametri di sicurezza previsti dalle normative di riferimento.

Un ulteriore strumento di Facility Management reso possibile da questa configurazione riguarda la gestione delle segnalazioni relative a problematiche o anomalie che possono emergere durante l'utilizzo degli ambienti. Tali segnalazioni possono essere inviate sia da parte di tecnici specializzati sia da parte degli utenti che frequentano gli spazi monitorati.

Anche in questo caso è stato dimostrato come l'utilizzo di strumenti come Google Forms, compilabili tramite specifiche applicazioni o dispositivi mobili, consenta di integrare tali segnalazioni all'interno dei modelli IFC utilizzati per il monitoraggio dei dati ambientali. In questo modo diventa possibile disporre, all'interno dello stesso ambiente informativo, sia dei dati misurati dalla sensoristica sia delle informazioni relative alla percezione e all'esperienza degli utenti.

A completamento del flusso di lavoro è stata inoltre sviluppata una procedura che, mediante l'utilizzo della programmazione a blocchi in ambiente Dynamo, congiuntamente agli script Python integrati e alla definizione di specifici Property Set, consente di visualizzare direttamente nel modello BIM i vincoli artistico-architettonici associati alle diverse tipologie di lavorazione.

Tale funzionalità risulta particolarmente utile nel caso degli edifici storici, nei quali la pianificazione degli interventi deve essere attentamente valutata e condivisa con le soprintendenze competenti, al fine di garantire il rispetto dei vincoli di tutela e la compatibilità degli interventi proposti.

In questo modo il Facility Manager può consultare lo stream dei dati provenienti dalla sensoristica, ricevere feedback da parte degli utenti e dei tecnici manutentori e pianificare eventuali interventi migliorativi sempre all'interno dello stesso ambiente informativo.

Nonostante i risultati positivi emersi dalla sperimentazione, l'approccio proposto presenta tuttavia alcune criticità.

In primo luogo, la specificità degli strumenti utilizzati richiede competenze tecniche avanzate e multidisciplinari, che spaziano dalla corretta modellazione e configurazione dei file IFC alla programmazione in linguaggio Python per la gestione e l'elaborazione dei dati provenienti dai database SQL, fino alla configurazione degli strumenti di visualizzazione come Blender-Bonsai. Un ulteriore aspetto da considerare riguarda la gestione dell'accesso ai dati sensibili. In tali contesti risulta necessario definire strategie adeguate che consentano la consultazione completa dei database senza compromettere la sicurezza delle informazioni.

Nel presente lavoro, tale problematica è stata affrontata mediante l'implementazione di uno specifico script Python in grado di leggere le credenziali di accesso da un file esterno, accessibile esclusivamente al gestore della rete, evitando così la diffusione involontaria di informazioni sensibili.

Inoltre, soprattutto nel caso del patrimonio storico, come evidenziato nell'analisi di Tab. 4.1, occorre considerare la limitata conoscenza dell'edificio stesso, in particolare per quanto riguarda le tecniche costruttive adottate, il passaggio delle componenti impiantistiche e la composizione delle stratigrafie costituenti l'involucro.

Disporre della maggiore quantità possibile di informazioni su tali aspetti risulta fondamentale ai fini di una corretta valutazione delle prestazioni termiche ed energetiche dell'edificio. Per

questo motivo, la metodologia descritta nel presente lavoro dovrebbe essere integrata con attività preliminari di ricerca e analisi documentaria sul costruito, attingendo ove possibile a fonti archivistiche o documentazione storica.

Qualora tali informazioni non siano disponibili, può rendersi necessario ricorrere a indagini più approfondite, anche di tipo invasivo, come ad esempio carotaggi o analisi stratigrafiche, da eseguire comunque in accordo con le soprintendenze competenti.

Nonostante la curva di apprendimento iniziale necessaria per integrare i diversi strumenti e processi possa risultare relativamente complessa, l'approccio proposto ha dimostrato la propria efficacia sia in contesti di piccola scala sia in applicazioni più complesse caratterizzate dalla presenza di numerosi vincoli.

Ciò dimostra che, pur operando su edifici esistenti, nei quali non sono presenti le fasi progettuali e costruttive in cui i vantaggi dell'utilizzo del BIM risultano generalmente più evidenti, l'utilizzo combinato di metodologie openBIM e sistemi IoT consente di estendere il valore del modello informativo anche alla fase gestionale, rafforzandone il ruolo di supporto ai processi decisionali.

Alla luce dei risultati ottenuti, l'esperienza maturata nel corso della ricerca ha inoltre permesso di individuare alcuni aspetti che potrebbero essere ulteriormente approfonditi e migliorati in sviluppi futuri.

In primo luogo, la gestione dei dati provenienti dai sensori potrebbe essere ottimizzata attraverso l'implementazione di sistemi più strutturati e accessibili dal lato del Facility Manager, semplificando la visualizzazione e l'interrogazione dei dati rappresentati nel modello attraverso strumenti come Blender-Bonsai.

Questo potrebbe avvenire, ad esempio, mediante lo sviluppo di API web-based accessibili anche a utenti non tecnici, quali gestori e curatori museali, che consentano di consultare il modello IFC e i dati associati senza la necessità di interagire direttamente con gli script Python o con l'ambiente di sviluppo utilizzato per la visualizzazione.

Un'analogia evoluzione potrebbe riguardare anche l'integrazione dei sistemi di raccolta dei feedback degli utenti e delle segnalazioni dei manutentori all'interno di piattaforme web dedicate. Ciò consentirebbe una consultazione più immediata e integrata delle informazioni, rendendo ancora più efficiente la gestione e la tutela degli ambienti e delle opere presenti nel patrimonio storico.

Nel complesso, l'analisi condotta sui casi studio ha evidenziato come l'integrazione tra modelli informativi, sistemi di monitoraggio IoT e strumenti di elaborazione dei dati possa contribuire in modo significativo a migliorare le modalità di gestione e di analisi degli edifici storici, fornendo un supporto concreto alle attività di monitoraggio, conservazione e pianificazione degli interventi.

I risultati ottenuti costituiscono pertanto la base per le considerazioni conclusive della ricerca, nelle quali verranno sintetizzati i principali contributi metodologici emersi e delineate alcune possibili direzioni di sviluppo futuro.

5 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

L'obiettivo della presente ricerca è stato quello di definire e testare un flusso di lavoro che, attraverso l'utilizzo di metodologie e strumenti open source e freeware, permettesse la rappresentazione e l'elaborazione di una vasta gamma di dati rilevati dagli edifici direttamente all'interno dei corrispettivi modelli IFC.

Particolare attenzione è stata rivolta al patrimonio storico costruito, contesto nel quale l'applicazione della metodologia BIM presenta criticità specifiche legate all'incertezza delle informazioni disponibili, alla presenza di vincoli conservativi e ai limiti intrinseci degli attuali sistemi di modellazione informativa.

L'analisi e l'elaborazione dei dati rilevati dagli edifici hanno inoltre consentito di estendere le riflessioni al più ampio tema del Facility Management, includendo aspetti quali il monitoraggio delle condizioni microclimatiche, la segnalazione di guasti o anomalie presenti nell'edificio e la visualizzazione dei vincoli architettonici da considerare nella pianificazione degli interventi migliorativi.

A partire dall'analisi delle peculiarità dell'HBIM e dei suoi principali limiti, la ricerca ha approfondito le tecnologie coinvolte nei processi di acquisizione, gestione e visualizzazione dei dati IoT, esaminando la letteratura esistente relativa alla rappresentazione di tali informazioni all'interno di modelli BIM.

Da questa analisi è emersa una lacuna significativa nello stato dell'arte, con la maggior parte degli studi analizzati orientata all'utilizzo di dashboard bidimensionali sviluppate su piattaforme proprietarie, solo parzialmente integrate con metodologie open source e con limitate possibilità di interazione diretta con il modello informativo.

Le possibilità di interazione all'interno dei modelli risultano inoltre ancora limitate. Sono infatti rari i casi in cui siano state sviluppate applicazioni dedicate che consentano agli utenti di fornire feedback sugli ambienti monitorati, ad esempio per segnalare situazioni di discomfort o per verificare lo stato degli spazi, come nel caso del livello di occupazione degli ambienti. Tali lacune risultano particolarmente evidenti nel contesto dell'edilizia storica.

La letteratura sull'HBIM si concentra prevalentemente sugli aspetti legati alla modellazione geometrica derivata da rilievi laser scanner e alla documentazione storica, mentre risultano ancora limitati gli studi che esplorano le potenzialità di tali modelli per l'analisi prestazionale e per lo sviluppo di strumenti di supporto al Facility Management.

Questa carenza appare particolarmente rilevante se si considerano approcci basati su risorse open source e openBIM, che, pur offrendo elevata flessibilità e possibilità di adattamento a contesti complessi, risultano ancora poco diffusi a causa di una curva di apprendimento iniziale generalmente più impegnativa rispetto all'utilizzo di software commerciali.

In questo contesto, uno degli elementi centrali emersi dalla ricerca riguarda la definizione di un insieme di parametri decisionali che, pur risultando marginali o assenti nel contesto standard del BIM applicato agli edifici di nuova costruzione, assumono un ruolo centrale nell'ambito dell'HBIM.

Tra i principali parametri rientrano, oltre agli indicatori prestazionali ed energetici, aspetti quali il grado di invasività degli interventi e la loro reversibilità, la compatibilità con i vincoli

storico-artistici, la presenza di apparati decorativi sensibili alle variazioni microclimatiche e la possibilità di acquisire informazioni conoscitive sull'edificio senza comprometterne l'integrità. L'introduzione di tali parametri nel processo decisionale rappresenta un contributo significativo rispetto allo stato dell'arte, poiché consente di superare una visione puramente prestazionale del modello informativo, orientando l'HBIM verso un approccio più consapevole e contestualizzato.

Il presente lavoro mira pertanto a dimostrare la fattibilità di un approccio alternativo, proponendo un'architettura aperta ed espandibile basata su strumenti open source e freeware.

In una prima fase sono stati analizzati i software presenti sul mercato per gli aspetti legati al Facility Management; successivamente si è cercato di riprodurre e ampliare funzionalità analoghe mediante l'utilizzo di tecnologie open source, adattandole alle esigenze specifiche emerse nel contesto dell'edilizia storica.

Per la gestione dello stream IoT, l'utilizzo del linguaggio di programmazione Python ha consentito la visualizzazione e l'elaborazione di dati direttamente collegati ai modelli IFC, relativi, ad esempio, a temperatura e umidità, indice PMV e consumi energetici.

È stato inoltre possibile visualizzare dati storici archiviati in database SQLite, interrogati mediante query definite all'interno di interfacce API realizzate appositamente. L'approccio proposto ha dimostrato come sia possibile configurare un Digital Shadow dell'edificio anche senza ricorrere all'utilizzo di software proprietari.

L'architettura del sistema testata nei casi studio si è dimostrata inoltre integrabile con ulteriori funzionalità rilevanti in ambito Facility Management, quali la gestione delle segnalazioni, la generazione di ticket di manutenzione e la visualizzazione dei vincoli architettonici direttamente all'interno del modello informativo.

Tali aspetti risultano particolarmente rilevanti nel contesto del patrimonio storico, nel quale la pianificazione degli interventi richiede una costante mediazione tra esigenze di conservazione, prestazioni energetiche e funzionalità degli spazi.

In questo senso, il caso studio delle Gallerie dell'Accademia di Venezia ha rivestito un ruolo centrale, consentendo di verificare come i parametri specifici dell'HBIM incidano concretamente sulle strategie di monitoraggio e gestione. Il contesto museale, caratterizzato dalla presenza di opere d'arte particolarmente sensibili alle variazioni ambientali e da stringenti vincoli conservativi, ha evidenziato come l'adozione di criteri esclusivamente termici ed energetici risulti insufficiente a supportare decisioni efficaci.

L'integrazione tra modello informativo, dati di monitoraggio IoT e feedback provenienti da utenti e manutentori ha permesso di restituire una visione più articolata dello stato degli ambienti, dimostrando il valore dell'HBIM come strumento di supporto alla gestione e alla tutela del patrimonio, piuttosto che come semplice modello descrittivo.

In coerenza con l'impostazione open source e openBIM adottata nel presente lavoro, tutti i materiali sviluppati nel corso della ricerca sono stati resi disponibili all'interno di una pagina GitHub dedicata. Il repository non si limita a raccogliere i codici sorgente utilizzati (script Python, file Dynamo, configurazioni IDS, ecc.), ma include anche schemi di flusso, procedure operative, esempi di configurazione e materiali di supporto utili alla comprensione e alla replicabilità del metodo proposto.

In questo senso, la documentazione online può essere considerata come un'estensione del testo scritto, assimilabile a un'appendice tecnica dinamica, pensata per approfondire gli aspetti implementativi che, per ragioni di sintesi e leggibilità, non trovano spazio nel corpo della tesi. Tale scelta intende favorire la trasparenza del processo di ricerca, agevolare il riuso e l'adattamento delle soluzioni proposte in contesti differenti e supportare ulteriori sviluppi futuri.

In sintesi, l'obiettivo principale della ricerca è stato lo sviluppo di un workflow basato su strumenti open source e freeware finalizzato a:

- La raccolta, lo streaming e l'elaborazione di dati relativi alle condizioni ambientali, al comfort percepito e ai consumi energetici, visualizzati direttamente nei modelli IFC;
- La possibilità per i tecnici manutentori di effettuare segnalazioni riguardanti eventuali criticità rilevate;
- La possibilità per utenti non specializzati e fruitori degli ambienti monitorati di inviare feedback sullo stato dei luoghi, in termini di comfort percepito, accessibilità degli spazi e qualità ambientale;
- La visualizzazione dei vincoli presenti nell'edificio a supporto della corretta pianificazione degli interventi migliorativi.

Nonostante le difficoltà iniziali legate alla configurazione di sistemi che richiedono competenze eterogenee (programmazione Python, configurazioni dei sensori, gestione dei database SQL, conoscenza degli standard openBIM, modellazione BIM, ecc.), sono emerse numerose potenzialità nell'utilizzo dei metodi proposti, tra le quali la possibilità di:

- Visualizzare dati all'interno di modelli tridimensionali utilizzando software open source e freeware, senza dover ricorrere a software proprietari con licenze basate sul consumo dei dati;
- Aggiornare dinamicamente il modello informativo in funzione dei dati selezionati;
- Scalare l'architettura IoT proposta in base alle esigenze operative;
- Fornire strumenti utili ai Facility Manager per il monitoraggio e l'ottimizzazione della gestione degli edifici, compresa la pianificazione degli interventi migliorativi sulla base dei vincoli rilevati.

Nel complesso, il lavoro svolto ha evidenziato come l'innovatività dell'approccio proposto non risieda nell'introduzione di nuovi strumenti tecnologici, bensì nell'integrazione coerente di metodologie e software esistenti, configurati e messi in relazione tra loro al fine di integrare dati, modelli e vincoli all'interno di un processo decisionale consapevole, specificamente calibrato sulle esigenze del patrimonio storico costruito.

In prospettiva futura, diversi sviluppi risultano possibili sulla base del lavoro svolto.

Tra questi si segnalano:

- L'integrazione del sistema con modelli predittivi basati su tecniche di machine learning, in grado di individuare preventivamente situazioni anomale o trend che potrebbero compromettere la conservazione delle opere o l'efficienza energetica degli edifici. L'ottimizzazione di questi aspetti consente di supportare strategie di manutenzione programmata e di gestione sostenibile del patrimonio storico, dove la prevenzione e il

controllo continuo delle condizioni ambientali rappresentano un elemento chiave per la conservazione a lungo termine;

- L'ampliamento della portabilità del sistema su piattaforme mobili e web, al fine di consentire la consultazione e la gestione dei dati anche da remoto, mediante applicazioni o interfacce dedicate;
- L'integrazione di ulteriori strumenti open source e script Python all'interno dell'ecosistema di Blender-Bonsai, finalizzati a migliorare ulteriormente il rendering dei dati visualizzati (ad esempio utilizzando software freeware come Unreal Engine [185] o Unity per creare esperienze interattive). Il miglioramento della resa grafica e dell'interattività può fungere da incentivo per una maggiore diffusione di questi sistemi;
- L'aggiunta di nuove informazioni interrogabili nel modello, ad esempio tramite pop-up informativi contenenti i dati relativi alle condizioni microclimatiche e i vincoli presenti negli ambienti selezionati;
- La possibilità di intervenire in modo bidirezionale sui sistemi di controllo, aprendo così la strada a una progressiva evoluzione dell'approccio da Digital Shadow a Digital Twin.

Tale evoluzione dovrà tuttavia essere affrontata con particolare attenzione alle specificità del patrimonio storico, mantenendo un equilibrio tra innovazione tecnologica, tutela dei beni e supporto consapevole ai processi decisionali.

SIGLE E ABBREVIAZIONI

ACDat	Ambiente di Condivisione dei Dati
AECO	Architecture, Engineering, Construction and Operations
AI	Artificial Intelligence
API	Application Programming Interface
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BCF	BIM Collaboration Format
BDS	Building Description System
BLE	Bluetooth Low Energy
BIM	Building Information Modeling
BMS	Building Management System
bSDD	buildingSMART Data Dictionary
bSI	buildingSMART International
CAD	Computer-Aided Design
CAFM	Computer-Aided Facility Management
CAM	Criteri Ambientali Minimi
CC	Cloud Computing
CDE	Common Data Environment
CEN	European Committee for Standardization
CMMS	Computerized Maintenance Management System
CSV	Comma-Separated Values
D.Lgs.	Decreto Legislativo
D.M.	Decreto Ministeriale
D.P.R.	Decreto del Presidente della Repubblica
EAM	Enterprise Asset Management
EN	European Norm / Norma Europea
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
EPD	Environmental Product Declaration
FM	Facility Management
FOSS	Free and Open Source Software
GG	Gradi Giorno
GIS	Geographic Information Systems
GLIDE	Graphical Language for Interactive Design
GPP	Green Public Procurement
HBIM	Heritage Building Information Modeling
HTML	HyperText Markup Language
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
IAQ	Indoor Air Quality
IDS	Information Delivery Specification
IEQ	Indoor Environmental Quality
IFC	Industry Foundation Classes
IFMA	International Facility Management Association
IoT	Internet of Things

ISO	International Organization for Standardization
IWMS	Integrated Workplace Management System
JSON	JavaScript Object Notation
KPI	Key Performance Indicator
KTH	Kungliga Tekniska högskolan
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LOD	Level of Detail
LOIN	Level of Information Need
ML	Machine Learning
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MVD	Model View Definition
PdR	Prassi di Riferimento
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
QR Code	Quick-Response Code
RFID	Radio-Frequency Identification
SOA	Service Oriented Architecture
SQL	Structured Query Language
TR	Technical Report
TS	Technical Specification
TVOC	Total Volatile Organic Compounds
UCM	Use Case Management
UNI	Ente Italiano di Normazione
URI	Uniform Resource Identifier
VOC	Volatile Organic Compounds
VR	Virtual Reality
XML	eXtensible Markup Language

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] T. Banh, *BIM Education-Global 2023 Update Report*, Natspec Construction Information, 2023.
- [2] C. Eastman, *An Outline of the Building Description System. Research Report No. 50*, Carnegie-Mellon Univ., Pittsburgh, Pa. Inst. of Physical Planning, 1974.
- [3] M. Riese, One Island East, Hong Kong: A Case Study in Construction Virtual Prototyping, in: *Virtual Futures for Design, Construction & Procurement*, 2009. <https://doi.org/10.1002/9781444302349.ch5>.
- [4] E. Mitera-Kiełbasa, K. Zima, BIM Policy Trends in Europe: Insights from a Multi-Stage Analysis, *Applied Sciences* 14 (2024). <https://doi.org/10.3390/app14114363>.
- [5] ISO, ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling - Part 1: Concepts and principles, 2018.
- [6] ISO, ISO 19650-2:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling - Part 2: Delivery phase of the assets, 2018.
- [7] ISO, ISO 19650-3:2020. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling - Part 3: Operational phase of the assets, 2020.
- [8] ISO, ISO 19650-4:2022. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling - Part 4: Information exchange, 2022.
- [9] ISO, ISO 19650-5:2020. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Part 5: Security-minded approach to information management, 2020.
- [10] UNI, UNI 11337-1:2017. Edilizia e opere di ingegneria civile - Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni - Parte 1: Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi, 2017.
- [11] N. Laohaviraphap, T. Waroonkun, Integrating Artificial Intelligence and the Internet of Things in Cultural Heritage Preservation: A Systematic Review of Risk Management and Environmental Monitoring Strategies, *Buildings* 14 (2024). <https://doi.org/10.3390/buildings14123979>.
- [12] F. Diara, HBIM Open Source: A Review, *ISPRS Int. J. Geoinf.* 11 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijgi11090472>.
- [13] G. Piras, F. Muzi, C. Zylka, Integration of BIM and GIS for the Digitization of the Built Environment, *Applied Sciences* 14 (2024). <https://doi.org/10.3390/app142311171>.

- [14] C. Baltes, Patrick J. Hanratty: Pioneer in Commercial CAD/CAM Software Systems, *IEEE Annals of the History of Computing* 46 (2024) 50–57. <https://doi.org/10.1109/MAHC.2024.3473389>.
- [15] American Machinist, The CAD/CAM Hall of Fame [Online], 1998. <https://www.americanmachinist.com/cad-and-cam/article/21892098/the-cad-cam-hall-of-fame> (accessed July 24, 2025).
- [16] D. Engelbart, *Augmenting human intellect: a conceptual framework*, SRI Summary Report AFOSR-3223, 1962.
- [17] I.E. Sutherland, Sketchpad a Man-Machine Graphical Communication System, *Simulation* 2 (1964). <https://doi.org/10.1177/003754976400200514>.
- [18] LetsBuild, A History of BIM - Aproplan [Online], 2024. <https://www.letsbuild.com/blog/a-history-of-bim> (accessed July 24, 2025).
- [19] C.M. Eastman, The Use of Computers Instead of Drawings in Building Design., *AIA Journal* 63 (1975).
- [20] C.M. Eastman, M. Henrion, Glide: A language for design information systems, in: *Proceedings of the 4th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '77, 1977. <https://doi.org/10.1145/563858.563863>.
- [21] Autodesk Support, How did Revit get its name? [Online], 2023. <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/How-did-Revit-get-its-name.html> (accessed July 25, 2025).
- [22] R. Aish, Building modelling: the key to integrated construction CAD, in: *The Fifth International Symposium on the Use of Computers for Environmental Engineering Related to Buildings*, Guildhall, Bath, 1986. <https://www.researchgate.net/publication/320347623>.
- [23] G.A. van Nederveen, F.P. Tolman, Modelling multiple views on buildings, *Automation in Construction* 1 (1992). [https://doi.org/10.1016/0926-5805\(92\)90014-B](https://doi.org/10.1016/0926-5805(92)90014-B).
- [24] Graphisoft, Graphisoft Archicad for Teamwork Announced [Online], 1997. <https://www.graphisoft.com/press-releases/atw/> (accessed July 28, 2023).
- [25] A. Redmond, A. Hore, M. Alshawi, R. West, Exploring how information exchanges can be enhanced through Cloud BIM, *Automation in Construction* 24 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.003>.
- [26] A.S. Borkowski, Evolution of BIM: epistemology, genesis and division into periods, *Journal of Information Technology in Construction* 28 (2023) 646–661. <https://doi.org/10.36680/J.ITCON.2023.034>.
- [27] A. Khudhair, H. Li, G. Ren, S. Liu, Towards future BIM technology innovations: A bibliometric analysis of the literature, *Applied Sciences* 11 (2021). <https://doi.org/10.3390/app11031232>.
- [28] A.A. Khan, A.O. Bello, M. Arqam, F. Ullah, Integrating Building Information Modelling and Artificial Intelligence in Construction Projects: A Review of Challenges and Mitigation Strategies, *Technologies* 12 (2024). <https://doi.org/10.3390/technologies12100185>.
- [29] A. Elsheikh, H.H. Alzamili, S.K. Al-Zayadi, A.S. Alboo-Hassan, Integration of GIS and BIM in Urban Planning -A Review, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1090 (2021). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1090/1/012128>.

- [30] S.O. Abioye, L.O. Oyedele, L. Akanbi, A. Ajayi, J.M. Davila Delgado, M. Bilal, O.O. Akinade, A. Ahmed, Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges, *Journal of Building Engineering* 44 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103299>.
- [31] N.Č. Babič, D. Rebolj, Culture Change in Construction Industry: from 2D Toward BIM Based Construction, *Journal of Information Technology in Construction* 21 (2016).
- [32] M. Murphy, E. McGovern, S. Pavia, Historic building information modelling (HBIM), *Structural Survey* 27 (2009). <https://doi.org/10.1108/02630800910985108>.
- [33] M. Murphy, E. McGovern, S. Pavia, Historic Building Information Modelling - Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 76 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006>.
- [34] J. Liu, B. Li, Heritage Building Information Modelling (HBIM): A Review of Published Case Studies, in: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-1-2024, 387–393. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-387-2024>.
- [35] P. Martín-Lerones, D. Olmedo, A. López-Vidal, J. Gómez-García-Bermejo, E. Zalama, BIM Supported Surveying and Imaging Combination for Heritage Conservation, *Remote Sens.* 13 (2021). <https://doi.org/10.3390/rs13081584>.
- [36] J.C.P. Cheng, J. Zhang, H.H.L. Kwok, J.C.K. Tong, Thermal performance improvement for residential heritage building preservation based on digital twins, *Journal of Building Engineering* 82 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108283>.
- [37] F. Bounouioua, D.R. Saffidine, A. Korichi, An Enhanced HBIM Framework Integrating Advanced Technologies to strengthen the Cultural Heritage, *Journal of Information Technology in Construction* 30 (2025) 570–602. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2025.024>.
- [38] buildingSMART International, Clarifying the “openBIM Workflow”: A Practical Breakdown [Online], (n.d.). <https://www.buildingsmart.org/clarifying-the-openbim-workflow/> (accessed August 1, 2025).
- [39] ISO, ISO 16739-1:2024. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries - Part 1: Data schema, 2024.
- [40] buildingSMART International, IFC 4.3.2.0 Documentation [Online], (n.d.). https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_3/ (accessed August 5, 2025).
- [41] buildingSMART International, Industry Foundation Classes (IFC), (n.d.). <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/> (accessed August 9, 2024).
- [42] buildingSMART International, MVD: Model View Definition [Online], (n.d.). <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/mvd/mvd-database/> (accessed August 5, 2025).
- [43] P. Borin, C. Zanchetta, *IFC: processi e modelli digitali openBIM per l’ambiente costruito*, Maggioli Editore, 2020.
- [44] buildingSMART International, IDS: Information Delivery Specification [Online], (n.d.). <https://github.com/buildingSMART/IDS/blob/development/Documentation/UserManual/README.md> (accessed August 11, 2025).

- [45] buildingSMART International, UCM: Use Case Management Service [Online], (n.d.). <https://www.buildingsmart.org/users/services/use-case-management-service/> (accessed August 11, 2025).
- [46] ACCA Software, usBIM.IDS: Information Delivery Specification [Online], (n.d.). <https://www.accasoftware.com/en/information-delivery-specification-ids> (accessed August 11, 2025).
- [47] buildingSMART International, BCF: BIM Collaboration Format [Online], (n.d.). <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/bim-collaboration-format/#software> (accessed August 11, 2025).
- [48] buildingSMART International, bSDD: buildingSMART Data Dictionary [Online], (n.d.). <https://www.buildingsmart.org/users/services/buildingsmart-data-dictionary/#what-is-the-bSDD> (accessed August 11, 2025).
- [49] M. Kładź, A.S. Borkowski, IDS Standard and bSDD Service as Tools for Automating Information Exchange and Verification in Projects Implemented in the BIM Methodology, *Buildings* 15 (2025). <https://doi.org/10.3390/buildings15030378>.
- [50] C.C. Eichler, C. Schranz, T. Krischmann, H. Urban, M. Hopferwieser, S. Fischer, *BIMcert Handbook: Basic Knowledge, openBIM Edition 2024*, BuildingSMART Austria, 2024.
- [51] ACCA Software, usBIM.bSDDeditor [Online], (n.d.). <https://www.accasoftware.com/en/bsdd-buildingsmart-data-dictionary> (accessed August 12, 2025).
- [52] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, M. Palaniswami, Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions, *Future Generation Computer Systems* 29 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>.
- [53] W.E. Zhang, Q.Z. Sheng, A. Mahmood, D.H. Tran, M. Zaib, S.A. Hamad, A. Aljubairy, A.A.F. Alhazmi, S. Sagar, C. Ma, The 10 Research Topics in the Internet of Things, in: *Proceedings - 2020 IEEE 6th International Conference on Collaboration and Internet Computing, (CIC)*, Atlanta, GA, USA, 2020. <https://doi.org/10.1109/CIC50333.2020.00015>.
- [54] Jordan Teicher, IBM - The little-known story of the first IoT device [Online], 2018. <https://www.ibm.com/think/topics/iot-first-device> (accessed June 9, 2025).
- [55] S.C. Liu, M. Tomizuka, G. Ulsoy, Strategic issues in sensors and smart structures, *Struct. Control Health Monit.* 13 (2006) 946-957. <https://doi.org/10.1002/stc.88>.
- [56] O.A. Postolache, J.M. Dias Pereira, P.M.B. Silva Girão, Smart Sensors Network for Air Quality Monitoring Applications, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 58 (2009) 3253–3262. <https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2022372>.
- [57] P.P. Ray, A survey on Internet of Things architectures, *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* 30 (2018) 291-319. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2016.10.003>.
- [58] N.M. Kumar, P.K. Mallick, The Internet of Things: Insights into the building blocks, component interactions, and architecture layers, in: *Procedia Computer Science* 132 (2018) 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.05.170>.
- [59] D. Groombridge, *Top Strategic Technology Trends 2023*, Gartner, 2022. www.gartner.com/en/information-technology (accessed August 18, 2025).

- [60] M. Attaran, B.G. Celik, Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities, *Decision Analytics Journal* 6 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>.
- [61] Global Market Insight, *Digital Twin Market Size & Share 2025 - 2034*, 2022. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/digital-twin-market> (accessed August 18, 2025).
- [62] Technavio, *Digital Twin Market Analysis North America, Europe, APAC, Middle East and Africa, South America - US, Germany, UK, Japan, Canada - Size and Forecast 2025-2029*, 2024. <https://www.technavio.com/report/digital-twin-market-size-industry-analysis> (accessed March 12, 2025).
- [63] B. Danette Allen, Digital Twins and Living Models at NASA, NTRS - NASA Technical Reports Server [Online], 2021. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210023699> (accessed March 20, 2025).
- [64] D.L. Iverson, Inductive System Health Monitoring with Statistical Metrics, NASA Ames Research Center, 2008. <https://www.researchgate.net/publication/246461583>.
- [65] D. Gelernter, *Mirror Worlds: or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox...How It Will Happen and What It Will Mean*, Oxford University Press, 1991. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195068122.001.0001>.
- [66] M. Grieves, J. Vickers, Digital twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, in: *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- [67] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow, Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research, *IEEE Access* 8 (2020). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.
- [68] P. Jouan, P. Hallot, Digital Twin: a HBIM-based Methodology to Support Preventive Conservation of Historic Assets through Heritage Significance Awareness, in: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-609-2019>.
- [69] P. Eriksson, V. Milić, T. Brostrom, Balancing preservation and energy efficiency in building stocks, *International Journal of Building Pathology and Adaptation* 38 (2020) 356-373. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-02-2019-0025>.
- [70] H.E. Silva, F.M.A. Henriques, The impact of tourism on the conservation and IAQ of cultural heritage: The case of the Monastery of Jerónimos (Portugal), *Building and Environment* 190 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107536>.
- [71] Z. Ni, J. Hupkes, P. Eriksson, G. Leijonhufvud, M. Karlsson, S. Gong, Parametric Digital Twins for Preserving Historic Buildings: A Case Study at Löfstad Castle in Östergötland, Sweden, *IEEE Access* 13 (2025) 3371–3389. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3525442>.
- [72] D.G.J. Opoku, S. Perera, R. Osei-Kyei, M. Rashidi, Digital twin application in the construction industry: A literature review, *Journal of Building Engineering* 40 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102726>.
- [73] Fire Risk Heritage, HBIM in Cultural Heritage Buildings Management: Advantages, and Limitations [Online], 2025. <https://www.fireriskheritage.net/publicationsand->

- research-documents-of-risk-to-cultural-heritage/hbim-in-cultural-heritage-buildings-advantages-and-limitations/ (accessed August 19, 2025).
- [74] J. Huang, A. Broekman, G. Markou, H.P. Chen, Framework for a practical and cost-effective IoT-enhanced structural health monitoring and damage diagnostics system with digital twinning, *J. Civ. Struct. Health Monit.* 15 (2025) 2059–2084. <https://doi.org/10.1007/s13349-025-00927-9>.
- [75] F. Iqbal, S. Mirzabeigi, Digital Twin-Enabled Building Information Modeling–Internet of Things (BIM-IoT) Framework for Optimizing Indoor Thermal Comfort Using Machine Learning, *Buildings* 15 (2025). <https://doi.org/10.3390/buildings15101584>.
- [76] P. Centorrino, A. Corbetta, E. Cristiani, E. Onofri, Managing crowded museums: Visitors flow measurement, analysis, modeling, and optimization, *Journal of Computational Science* 53 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2021.101357>.
- [77] Arduino, Arduino Cloud [Online], (n.d.). <https://docs.arduino.cc/arduino-cloud/guides/overview/> (accessed August 21, 2025).
- [78] I.C. Panagou, S. Katsoulis, E. Nannos, F. Zantalis, G. Koulouras, A Comprehensive Evaluation of IoT Cloud Platforms: A Feature-Driven Review with a Decision-Making Tool, *Sensors* 25 (2025) 5124. <https://doi.org/10.3390/s25165124>.
- [79] Python Software Foundation, Python [Online], (n.d.). <https://www.python.org/> (accessed August 22, 2025).
- [80] P.N. Siva, R. Yamaganti, A Review on Python for Data Science, Machine Learning and IoT, *International Journal of Scientific & Engineering Research* 10 (2019). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18708.48000>.
- [81] Microsoft, Microsoft Azure [Online], (n.d.). <https://azure.microsoft.com/it-it/explore/> (accessed August 22, 2025).
- [82] Autodesk, Autodesk Tandem [Online], (n.d.). <https://intandem.autodesk.com/> (accessed August 23, 2025).
- [83] ACCA Software, usBIM.IoT: BIM and IoT Integration Platform [Online], (n.d.). <https://www.accasoftware.com/en/bim-iot-platform> (accessed December 11, 2022).
- [84] G. Desogus, E. Quaquero, G. Rubiu, G. Gatto, C. Perra, BIM and IoT Sensors Integration: A Framework for Consumption and Indoor Conditions Data Monitoring of Existing Buildings, *Sustainability* 13 (2021). <https://doi.org/10.3390/su13084496>.
- [85] IfcOpenShell, Bonsai - Blender extensions. A native Building Information Model authoring platform using IFC [Online], (n.d.). <https://extensions.blender.org/add-ons/bonsai/> (accessed August 26, 2025).
- [86] Blender Foundation, Blender. The Free and Open Source 3D Creation Software [Online], (n.d.). <https://www.blender.org/> (accessed August 26, 2025).
- [87] D. Avogaro, C. Zanchetta, Bridging Information from Manufacturing to the AEC Domain: The Development of a Conversion Framework from STEP to IFC, *Systems* 13 (2025). <https://doi.org/10.3390/systems13060421>.
- [88] IfcOpenShell, IfcOpenShell. The open source IFC toolkit and geometry engine [Online], (n.d.). <https://ifcopenshell.org/> (accessed August 26, 2025).
- [89] IFMA, Cos'è il Facility Management [Online], (n.d.). https://www.ifma.it/index.php?pagina=articolo.php&id_articolo=25&var_id_menu=68&nodata (accessed October 17, 2024).

- [90] Accruent Company, Accruent [Online], (n.d.).
<https://www.accruent.com/solutions/facility-asset-management-software> (accessed June 23, 2023).
- [91] Eptura, SpaceIQ [Online], (n.d.). <https://spaceiq.com/> (accessed June 23, 2023).
- [92] Namirial, Building in Cloud [Online], (n.d.). <https://buildingincloud.net/> (accessed December 11, 2025).
- [93] JLL Technologies, Corrigo / VergeSense [Online], (n.d.).
<https://www.jllt.com/facilities-management/> (accessed March 23, 2024).
- [94] Siemens, Siemens Building X [Online], (n.d.).
<https://xcelerator.siemens.com/global/en/products/buildings/building-x/solutions/applications/lifecycle-twin.html> (accessed October 13, 2024).
- [95] Fluke Corporation, eMaint [Online], (n.d.). <https://www.fluke.com/en-us/products/fluke-software/emaint-cmms> (accessed June 23, 2023).
- [96] Facilio Inc., Facilio [Online], (n.d.). <https://facilio.com/> (accessed June 23, 2023).
- [97] FM:Systems Group, FM:Systems [Online], (n.d.). <https://fmsystems.com/> (accessed March 23, 2023).
- [98] Geomap srl, Geomap [Online], (n.d.). <https://www.geomap.it/> (accessed January 24, 2023).
- [99] Descor srl, Infocad [Online], (n.d.). <https://www.infocad.fm/> (accessed June 25, 2023).
- [100] Limble, Limble CMMS [Online], (n.d.). <https://limblecmms.com/> (accessed June 24, 2023).
- [101] IBM, Maximo Asset Management [Online], (n.d.). <https://www.ibm.com/it-it/products/maximo/asset-management> (accessed June 30, 2023).
- [102] Tecnoteca srl, OpenMAINT [Online], (n.d.). <https://www.tecnoteca.com> (accessed November 10, 2022).
- [103] Oracle, Oracle Maintenance Cloud [Online], (n.d.).
<https://www.oracle.com/it/scm/maintenance/> (accessed October 23, 2023).
- [104] OrthoGraph Enterprise, OrthoGraph [Online], (n.d.). <https://www.orthograph.com/> (accessed March 23, 2023).
- [105] Building Connection, Planon [Online], (n.d.). <https://planonsoftware.com/uk/> (accessed June 30, 2023).
- [106] PlanRadar srl, PlanRadar [Online], (n.d.). <https://www.planradar.com/it/> (accessed June 23, 2023).
- [107] IBM, Tririga Application Suite [Online], (n.d.). <https://www.ibm.com/it-it/products/tririga> (accessed January 11, 2026).
- [108] TeamSystem, TeamSystem Enterprise Asset Management [Online], (n.d.).
<https://www.teamsystem.com/construction/asset-management/> (accessed June 28, 2023).
- [109] ACCA Software, BIM tools usBIM [Online], (n.d.). <https://www.acca.it/bim-tools> (accessed October 1, 2022).
- [110] Arduino, Arduino IoT Cloud [Online], (n.d.). <https://cloud.arduino.cc/> (accessed January 13, 2023).

- [111] Amazon Web Services, AWS IoT Core [Online], (n.d.). <https://aws.amazon.com/it/iot-core/> (accessed January 23, 2023).
- [112] Microsoft, Azure IoT Hub [Online], (n.d.). <https://azure.microsoft.com/en-us/products/iot-hub> (accessed January 23, 2023).
- [113] Bosch, Bosch IoT Suite [Online], (n.d.). <https://bosch-iot-suite.com/> (accessed January 23, 2023).
- [114] Particle Industries, Particle [Online], (n.d.). <https://www.particle.io/> (accessed January 23, 2023).
- [115] Siemens, Siemens Insights Hub [Online], (n.d.). <https://plm.sw.siemens.com/en-US/insights-hub/> (accessed July 23, 2023).
- [116] PTC, ThingWorx IIoT Platform: Industrial IoT Software [Online], (n.d.). <https://www.ptc.com/en/products/thingworx> (accessed October 23, 2023).
- [117] ThingsBoard, ThingsBoard: open source IoT Platform [Online], (n.d.). <https://thingsboard.io/> (accessed October 10, 2023).
- [118] MathWorks, ThingSpeak [Online], (n.d.). <https://thingspeak.mathworks.com/> (accessed October 23, 2023).
- [119] Elsevier B.V., Scopus [Online], (n.d.). <https://www.scopus.com/> (accessed August 27, 2022).
- [120] Centre for Science and Technology Studies Leiden University, VOSviewer. Visualizing scientific landscapes [Online], (n.d.). <https://www.vosviewer.com/> (accessed August 27, 2025).
- [121] A.S. Borkowski, Low-Cost Internet of Things Solution for Building Information Modeling Level 3B—Monitoring, Analysis and Management, *Journal of Sensor and Actuator Networks* 13 (2024). <https://doi.org/10.3390/jsan13020019>.
- [122] D.G.J. Opoku, S. Perera, R. Osei-Kyei, M. Rashidi, K. Bamdad, T. Famakinwa, Digital twin for indoor condition monitoring in living labs: University library case study, *Automation in Construction* 157 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105188>.
- [123] Z. ElArwady, A. Kandil, M. Afiffy, M. Marzouk, Modeling indoor thermal comfort in buildings using digital twin and machine learning, *Developments in the Built Environment* 19 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100480>.
- [124] Y. Qian, J. Leng, K. Zhou, Y. Liu, How to measure and control indoor air quality based on intelligent digital twin platforms: A case study in China, *Building and Environment* 253 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111349>.
- [125] L. Closson, C. Cérin, D. Donsez, J.L. Baudouin, Design of a Meaningful Framework for Time Series Forecasting in Smart Buildings, *Information* 15 (2024). <https://doi.org/10.3390/info15020094>.
- [126] S. Saadatifar, A.O. Sawyer, D. Byrne, Occupant-Centric Digital Twin: A Case Study on Occupant Engagement in Thermal Comfort Decision-Making, *Architecture* 4 (2024) 390–415. <https://doi.org/10.3390/architecture4020022>.
- [127] F. Han, F. Du, S. Jiao, K. Zou, Predictive Analysis of a Building's Power Consumption Based on Digital Twin Platforms, *Energies* 17 (2024). <https://doi.org/10.3390/en17153692>.

- [128] A. Arsiwala, F. Elghaish, M. Zoher, Digital twin with Machine learning for predictive monitoring of CO2 equivalent from existing buildings, *Energy and Buildings* 284 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112851>.
- [129] E. Congiu, G. Desogus, C. Frau, G. Gatto, S. Pili, Web-Based Management of Public Buildings: A Workflow Based on Integration of BIM and IoT Sensors with a Web-GIS Portal, *Buildings* 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/buildings13051327>.
- [130] R. Sanz-Jimeno, S. Álvarez-Díaz, A tool based on the industry foundation classes standard for dynamic data collection and automatic generation of building automation control networks, *Journal of Building Engineering* 78 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107625>.
- [131] M. Jradi, B.E. Madsen, J.H. Kaiser, DanRETwin: A Digital Twin Solution for Optimal Energy Retrofit Decision-Making and Decarbonization of the Danish Building Stock, *Applied Sciences* 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13179778>.
- [132] C. Li, P. Lu, W. Zhu, H. Zhu, X. Zhang, Intelligent Monitoring Platform and Application for Building Energy Using Information Based on Digital Twin, *Energies* 16 (2023). <https://doi.org/10.3390/en16196839>.
- [133] A. Trombadore, D. Giorgi, G. Calcagno, G. Pierucci, Enabling an augmented building experience by encouraging user engagement, *TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment* 25 (2023) 204-213. <https://doi.org/10.36253/techne-13724>.
- [134] K. Kanna, K. AIT Lachguer, R. Yaagoubi, MyComfort: An integration of BIM-IoT-machine learning for optimizing indoor thermal comfort based on user experience, *Energy and Buildings* 277 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112547>.
- [135] G. Starace, A. Tiwari, G. Colangelo, A. Massaro, Advanced Data Systems for Energy Consumption Optimization and Air Quality Control in Smart Public Buildings Using a Versatile Open Source Approach, *Electronics* 11 (2022). <https://doi.org/10.3390/electronics11233904>.
- [136] L.C. Tagliabue, F.R. Cecconi, S. Maltese, S. Rinaldi, A.L.C. Ciribini, A. Flammini, Leveraging Digital Twin for Sustainability Assessment of an Educational Building, *Sustainability* 13 (2021). <https://doi.org/10.3390/su13020480>.
- [137] M. Valinejadshoubi, O. Moselhi, A. Bagchi, A. Salem, Development of an IoT and BIM-based automated alert system for thermal comfort monitoring in buildings, *Sustainable Cities and Society* 66 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102602>.
- [138] V. Villa, B. Naticchia, G. Bruno, K. Aliev, P. Piantanida, D. Antonelli, IoT Open-Source Architecture for the Maintenance of Building Facilities, *Applied Sciences* 11 (2021). <https://doi.org/10.3390/app11125374>.
- [139] H. Zahid, O. Elmansoury, R. Yaagoubi, Dynamic Predicted Mean Vote: An IoT-BIM integrated approach for indoor thermal comfort optimization, *Automation in Construction* 129 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103805>.
- [140] I. Mujan, D. Licina, M. Kljajić, A. Čulić, A.S. Anđelković, Development of indoor environmental quality index using a low-cost monitoring platform, *Journal of Cleaner Production* 312 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127846>.
- [141] S. Serroni, M. Arnesano, L. Violini, G.M. Revel, C. Carobbi, An IoT measurement solution for continuous indoor environmental quality monitoring for buildings

- renovation, *ACTA IMEKO* 10 (2021) 230–238.
https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v10i4.1182.
- [142] B. Mataloto, D. Calé, K. Carimo, J.C. Ferreira, R. Resende, 3D IoT System for Environmental and Energy Consumption Monitoring System, *Sustainability* 13 (2021).
<https://doi.org/10.3390/su13031495>.
- [143] A. Zaballos, A. Briones, A. Massa, P. Centelles, V. Caballero, A Smart Campus' Digital Twin for Sustainable Comfort Monitoring, *Sustainability* 12 (2020).
<https://doi.org/10.3390/su12219196>.
- [144] N. Moretti, X. Xie, J. Merino, J. Brazauskas, A.K. Parlikad, An openBIM Approach to IoT Integration with Incomplete As-Built Data, *Applied Sciences* 10 (2020).
<https://doi.org/10.3390/app10228287>.
- [145] I.C. Wu, C.C. Liu, A visual and persuasive energy conservation system based on BIM and IoT technology, *Sensors* 20 (2020). <https://doi.org/10.3390/s20010139>.
- [146] S.H. Khajavi, N.H. Motlagh, A. Jaribion, L.C. Werner, J. Holmstrom, Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings, *IEEE Access* 7 (2019).
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946515>.
- [147] B. Dave, A. Buda, A. Nurminen, K. Främpling, A framework for integrating BIM and IoT through open standards, *Automation in Construction* 95 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.022>.
- [148] K.M. Chang, R.J. Dzung, Y.J. Wu, An Automated IoT Visualization BIM Platform for Decision Support in Facilities Management, *Applied Sciences* 8 (2018).
<https://doi.org/10.3390/app8071086>.
- [149] K. Kang, J. Lin, J. Zhang, BIM- and IoT-based monitoring framework for building performance management, *Journal of Structural Integrity and Maintenance* 3 (2018).
<https://doi.org/10.1080/24705314.2018.1536318>.
- [150] Unity Technologies, Unity [Online], (n.d.). <https://unity.com/> (accessed March 13, 2025).
- [151] Autodesk, Autodesk 3ds Max [Online], (n.d.).
<https://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview> (accessed March 18, 2025).
- [152] T. Widström, *Enhanced Energy Efficiency and Preservation of Historic Buildings: Methods and Tools for Modeling*, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2012.
- [153] A.L. Webb, Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.145>.
- [154] L.D. Pereira, V. Tavares, N. Soares, Up-To-Date Challenges for the Conservation, Rehabilitation and Energy Retrofitting of Higher Education Cultural Heritage Buildings, *Sustainability* 13 (2021). <https://doi.org/10.3390/su13042061>.
- [155] G. Carbonara, Energy efficiency as a protection tool, *Energy and Buildings* 95 (2015) 9-12. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.052>.
- [156] R.P. Kramer, H.L. Schellen, A.W.M. van Schijndel, Impact of ASHRAE's museum climate classes on energy consumption and indoor climate fluctuations: Full-scale measurements in museum Hermitage Amsterdam, *Energy and Buildings* 130 (2016) 286-294. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.016>.

- [157] A. Martínez-Molina, I. Tort-Ausina, S. Cho, J.L. Vivancos, Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 61 (2016) 70-85. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.018>.
- [158] G. Leijonhufvud, T. Broström, Standardizing the indoor climate in historic buildings: opportunities, challenges and ways forward, *Journal of Architectural Conservation* 24 (2018) 3-18. <https://doi.org/10.1080/13556207.2018.1447301>.
- [159] UNI, UNI EN 15757:2010. Conservazione del patrimonio culturale – Specifiche concernenti la temperatura e l'umidità relativa per limitare i danni meccanici causati dal clima ai materiali organici igroscopici, 2010.
- [160] ASHRAE, HVAC Applications. Chapter 23: Museums, Galleries, Archives, and Libraries, in: *ASHRAE Handbook*, 2011.
- [161] M.A. De Vivo, T. Dalla Mora, M. Scarpa, F. Peron, Restauro dell'architettura. Per un progetto di qualità, in: *Conservazione Preventiva e Programmata Del Patrimonio Culturale: Orientarsi Nel Labirinto Normativo per Una Prassi Operativa Di Qualità*, SIRA Società Italiana per il Restauro dell'Architettura, Napoli, 2023: pp. 408–415.
- [162] R. Mason, A. Erica, Assessing Values in Conservation Planning: Methodological Issues and Choices, in: *Assessing the Values of Cultural Heritage. Research Report*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 2002.
- [163] F.R. d'Ambrosio Alfano, B.W. Olesen, B.I. Palella, Povl Ole Fanger's impact ten years later, *Energy and Buildings* 152 (2017) 243-249. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.052>.
- [164] P. O. Fanger, *Thermal comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*, Danish Technical Press, Copenhagen (1970).
- [165] ISO, ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005.
- [166] ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2020.
- [167] J. Van Hoof, Forty years of Fanger's model of thermal comfort: Comfort for all?, *Indoor Air* 18 (2008). <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00516.x>.
- [168] P. Jayathissa, M. Quintana, M. Abdelrahman, C. Miller, Humans-as-a-sensor for buildings—intensive longitudinal indoor comfort models, *Buildings* 10 (2020). <https://doi.org/10.3390/buildings10100174>.
- [169] D. Cavallo, M. De Gregorio, C. Mirarchi, A. Pavan, Standard BIM, il mondo dopo la ISO 19650 [Online], InGenio , 2023. <https://www.ingenio-web.it/articoli/standard-bim-il-mondo-dopo-la-iso-19650/> (accessed October 20, 2025).
- [170] 01building, BIM e normativa: le norme ISO e UNI di riferimento [Online], 2023. <https://www.01building.it/bim-e-normativa-le-norme-iso-e-uni-di-riferimento/> (accessed October 22, 2025).
- [171] Ministero dello Sviluppo Economico, D.M. 26 Giugno 2015. Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prestazioni e dei requisiti minimi degli edifici, 2015. https://www.mimit.gov.it/images/stories/normativa/DM_Linee_guida_APE.pdf (accessed September 3, 2025).

- [172] L. Fontanella, Building regulatory requirements diagrams - D.M. 26/06/2015, D.M. 23/06/2022 CAM [Online repository], 2026. <https://github.com/lfontanella/building-regulatory-requirements-diagrams> (accessed February 16, 2026).
- [173] BibLus - ACCA Software, Decreto Requisiti Minimi 2025: guida e novità [Online], 2025. <https://biblus.acca.it/download/decreto-requisiti-minimi-dm-26-giugno-2015/#toggle-id-1> (accessed September 3, 2025).
- [174] Ministro della Transizione Ecologica, D.M. 23 giugno 2022. Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi, 2022.
- [175] ANIT, CAM - Criteri Ambientali Minimi. Regole per l'edilizia in vigore dal 4 dicembre 2022 (Decreto 23 giugno 2022) [Online], 2023. www.anit.it (accessed September 4, 2024).
- [176] KTH Royal Institute of Technology, KTH Live-In Lab [Online], (n.d.). <https://www.liveinlab.kth.se/> (accessed June 5, 2024).
- [177] NBS National Building Specification, NBS' 10th National BIM Report [Online], 2020. <https://www.thenbs.com/knowledge/national-bim-report-2020> (accessed September 12, 2025).
- [178] buildingSMART International, IfcSensor - IFC 4.3.2 Documentation [Online], (n.d.). <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/IfcSensor.htm> (accessed February 10, 2024).
- [179] A.J. Kent, When Topology Trumped Topography: Celebrating 90 Years of Beck's Underground Map, *The Cartographic Journal* 58 (2021). <https://doi.org/10.1080/00087041.2021.1953765>.
- [180] LIM.lab - Laboratorio di Modellazione Informatizzata - Università degli studi di Padova, BuildingSMART Data Dictionary - bSDD [Online], 2025. <https://search.bsdd.buildingsmart.org/uri/LIMlab/IoT/0.5> (accessed January 15, 2025).
- [181] L. Fontanella, Proprietary and openBIM Workflows for Thermal Transmittance Assessment [Online repository], 2026. <https://github.com/lfontanella/thermal-transmittance-workflows> (accessed February 16, 2026).
- [182] L. Fontanella, IoT Streaming Workflows for Environmental Monitoring [Online repository], 2026. <https://github.com/lfontanella/iot-streaming-workflows> (accessed February 17, 2026).
- [183] L. Fontanella, Web-based visitor comfort survey. Gallerie dell'Accademia di Venezia case study [Online repository], 2026. <https://github.com/lfontanella/gallerie-comfort-survey> (accessed February 16, 2026).
- [184] L. Fontanella, HBIM intervenability workflows for decision support in heritage buildings [Online repository], 2026. <https://github.com/lfontanella/hbim-intervenability-workflows> (accessed February 18, 2026).
- [185] Epic Games Inc., Unreal Engine, (n.d.). <https://www.unrealengine.com/en-US> (accessed March 13, 2025).

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1.1: Pubblicazioni scientifiche incentrate sulla metodologia BIM (fonte: Scopus)	1
Fig. 1.2: Patrick J. Hanratty - PRONTO (fonte: www.aproplan.com/blog/a-history-of-bim)	7
Fig. 1.3: Ivan Sutherland - Sketchpad (fonte: Sutherland, Ivan E., 1963)	7
Fig. 1.4: GLIDE (fonte: www.aproplan.com/blog/a-history-of-bim)	7
Fig. 1.5: ArchiCAD (fonte: www.aproplan.com/blog/a-history-of-bim)	8
Fig. 1.6: Pro/ENGINEER (fonte: www.youtube.com/watch?v=tY_Gy-EElc0)	8
Fig. 1.7: Revit Release 1.0 (fonte: www.yobyot.com/revit/revit-release-1-0-20th-anniversary/2020/10/21)	9
Fig. 1.8: Eventi significativi dello sviluppo del BIM (fonte: Borkowski, 2023)	10
Fig. 1.9: From Scan to HBIM. (fonte: Murphy et al., 2009)	11
Fig. 1.10: Modellazione di elementi HBIM (fonte: Murphy et al., 2009)	12
Fig. 1.11: Andamento pubblicazioni HBIM (fonte: Scopus)	12
Fig. 1.12: Digital Twin - HBIM (fonte: Cheng et al., 2024)	13
Fig. 1.13: Museo Egizio Torino (fonte: www.museoegizio.it/scopri/tour-virtuali)	14
Fig. 1.14: Standard openBIM (fonte: buildingSMART International)	15
Fig. 1.15: Industry Foundation Classes IFC (fonte: buildingSMART International)	16
Fig. 1.16: Schema IFC	17
Fig. 1.17: IfcWall – esempio di struttura IFC	18
Fig. 1.18: PredefinedType della classe IfcWall (fonte: buildingSMART International)	18
Fig. 1.19: Property set della classe IfcWall (fonte: buildingSMART International)	19
Fig. 1.20: IfcRelationship (fonte: buildingSMART International)	20
Fig. 1.21: IDS – Information Delivery Specification	21
Fig. 1.22: IDS – Flusso di validazione IFC (fonte: buildingSMART International)	22
Fig. 1.23: bSDD – buildingSMART Data Dictionary (fonte: Kladz et al., 2025)	23
Fig. 1.24: Esempio di dizionario bSDD (fonte: buildingSMART International)	24
Fig. 1.25: usBIM.bSDDeditor (fonte: ACCA Software)	25
Fig. 1.26: usBIM.browser (fonte: ACCA Software)	25
Fig. 1.27: Dashboard IoT (fonte: Arduino Store)	26
Fig. 1.28: Architettura IoT a tre livelli (fonte: M.Peddolla, 2021)	28
Fig. 1.29: Digital Twin (fonte: www.gao.gov/products/gao-23-106453)	30
Fig. 1.30: Andamento pubblicazioni Digital Twin - BIM - IoT (fonte: Scopus)	30
Fig. 1.31: Sensori di temperatura utilizzati sullo Space Shuttle (fonte: Iverson D., 2008)	31
Fig. 1.32: Livelli di integrazione da Digital Model a Digital Twin (fonte: adattamento dell'autore da Fuller et al., 2020)	32
Fig. 1.33: Digital Twin a supporto dei processi decisionali per la conservazione dei beni (fonte: Jouan et al., 2019)	33
Fig. 1.34: Impatto del turismo sulla conservazione e sulla qualità dell'aria interna (fonte: Silva et al., 2021)	34
Fig. 1.35: Arduino Device (fonte: Arduino Docs)	36
Fig. 1.36: Arduino Cloud (fonte: Arduino Docs)	37
Fig. 1.37: Microsoft Azure (fonte: learn.microsoft.com)	37

Fig. 1.38: Microsoft Power BI (fonte: www.learn.microsoft.com).....	38
Fig. 1.39: Autodesk Tandem (fonte: www.intandem.autodesk.com).....	39
Fig. 1.40: usBIM.IoT (fonte: biblus.acca.it).....	40
Fig. 1.41: Nodi Dynamo (fonte: DynamoBim.org).....	42
Fig. 1.42: PMV visualizzato nel modello informativo (fonte: Zahid et al., 2021)	42
Fig. 1.43: Visualizzazione di un modello IFC in Blender-Bonsai (fonte: Blender Extensions) ..	43
Fig. 1.44: Blender: programmazione orientata agli oggetti (fonte: github.com/IfcOpenShell/IfcOpenShell/issues/1227)	44
Fig. 1.45: Tipologie di sistemi FM	47
Fig. 1.46: Rete Cluster Keyword (fonte: VOSviewer)	56
Fig. 1.47: Mappe di densità Keyword (fonte: VOSviewer)	57
Fig. 1.48: Software utilizzati e visualizzazione dati	66
Fig. 1.49: Dati monitorati	67
Fig. 2.1: Sfide per gli edifici storici (fonte: Pereira et al., 2021)	70
Fig. 2.2: Calcolo PMV	73
Fig. 2.3: Relazione tra PMV e PPD (fonte: www.quadco.engineering)	74
Fig. 2.4: Schema applicativo degli standard nel mondo (fonte: www.ingenio-web.it)	76
Fig. 2.5: Requisiti minimi degli edifici – involucro.....	89
Fig. 2.6: CAM Specifiche tecniche (fonte: Guida CAM ANIT 2023)	93
Fig. 2.7: CAM Ristrutturazione 1° livello	94
Fig. 2.8: Edificio residenziale convenzionale	96
Fig. 2.9: Testbed EM: Edificio Malvinas väg - Live-In Lab.....	97
Fig. 2.10: Testbed gestiti dal KTH (fonte: KTH Live-In Lab)	97
Fig. 2.11: Testbed EM - KTH Live-In Lab	98
Fig. 2.12: Gallerie dell'Accademia di Venezia.....	99
Fig. 2.13: Sala I (sinistra), Sala II (centro), Sala XXIII (destra)	99
Fig. 3.1: Interazione tra i diversi ambiti legati al FM.....	101
Fig. 3.2: Interazione tra figure professionali e strumenti per il Facility Management	102
Fig. 3.3: Modellazione BIM in Autodesk Revit	103
Fig. 3.4: Gallerie dell'Accademia di Venezia. Sala XXIII	104
Fig. 3.5: Modellazione degli elementi tecnici.....	105
Fig. 3.6: Geolocalizzazione dell'edificio.....	105
Fig. 3.7: Esportazione del modello in formato IFC	106
Fig. 3.8: Pset ufficiali della classe IfcSensor (fonte: ifc43-docs.standards.buildingsmart.org)	110
Fig. 3.9: bSDD IoT e Blender-Bonsai	113
Fig. 3.10: Specifiche IDS.....	114
Fig. 3.11: Arduino MKR WiFi 1010 e sensore di temperatura e umidità DHT22	115
Fig. 3.12: Arduino IDE	116
Fig. 3.13: Procedure per la raccolta e la visualizzazione dei dati IoT	117
Fig. 3.14: Microsoft Azure	117
Fig. 3.15: Collegamento sensore Arduino IDE – Microsoft Azure	118
Fig. 3.16: Stream Analytics Job.....	118
Fig. 3.17: Streaming dei dati mediante software proprietari	119

Fig. 3.18: Schema di funzionamento di un broker MQTT (fonte: www.objetconnecte.com)	120
Fig. 3.19: Visualizzazione dello stream dati in Blender	121
Fig. 3.20: Streaming dei dati mediante software open source	122
Fig. 3.21: Segnalazione guasti e report nel Facility Management	124
Fig. 3.22: Workflow di segnalazione guasti e anomalie	125
Fig. 3.23: Survey utenti e report	126
Fig. 3.24: Middleware FM – Vincoli degli interventi	129
Fig. 3.25: Middleware FM – Vincoli delle lavorazioni	130
Fig. 3.26: Revit - Dynamo per la definizione dei vincoli sugli interventi di manutenzione...	131
Fig. 3.27: Modellazione BIM per analisi energetiche	132
Fig. 3.28: Programmazione a blocchi in ambiente Dynamo	133
Fig. 3.29: Verifica del superamento dei limiti di trasmittanza degli elementi opachi	133
Fig. 3.30: IDS per i requisiti minimi degli edifici mediante usBIM.IDSeditor e relativo file XML	134
Fig. 3.31: Verifica requisiti informativi	134
Fig. 3.32: Schema IfcSpace – Heated Room	135
Fig. 3.33: Limiti trasmittanze per nuovi edifici e ampliamenti	136
Fig. 3.34: Verifica delle trasmittanze mediante IfcOpenShell	136
Fig. 3.35: Lettura dei dati mediante Arduino Cloud	138
Fig. 3.36: Visualizzazione dello stream di dati in Microsoft Power BI	139
Fig. 3.37: Visualizzazione dello stream dati in Autodesk Tandem	139
Fig. 3.38: Arduino IDE e broker MQTT Mosquitto	140
Fig. 3.39: Collegamento tra Visual Studio Code e Blender	141
Fig. 3.40: Visualizzazione dello stream di dati nei modelli IFC	142
Fig. 3.41: PMV e temperatura nei locali monitorati	143
Fig. 3.42: Testbed EM - KTH	145
Fig. 3.43: Piano tipo Testbed EM	145
Fig. 3.44: Codici univoci dei sensori del Testbed EM	147
Fig. 3.45: Database SQL	147
Fig. 3.46: Modello IFC visualizzato in Blender-Bonsai	148
Fig. 3.47: Middleware API per l'interrogazione dei dati	148
Fig. 3.48: Visualizzazione dei dati nel modello	149
Fig. 3.49: Visualizzazione dei dati da database	150
Fig. 3.50: Alert del superamento delle soglie di temperatura previste	151
Fig. 3.51: Galleria dell'Accademia di Venezia, Sala XXIII vista dell'abside	153
Fig. 3.52: Monitoraggio opere e visualizzazione alert	153
Fig. 3.53: Visualizzazione della segnalazione di guasto	155
Fig. 3.54: Applicazione per la Comfort Survey	156
Fig. 3.55: Property Set per l'intervenibilità sui prospetti	158
Fig. 3.56: Impianti tecnologici installati nelle murature	159
Fig. 3.57: Scheda Elements generata mediante Dynamo	160
Fig. 3.58: Elenco della fattibilità degli interventi per singolo elemento	161
Fig. 3.59: Sintesi dell'intervenibilità degli elementi del modello	162
Fig. 3.60: Colorazione del modello in base ai livelli di intervenibilità	162

Fig. 3.61: Livelli di intervenibilità nella zona absidale	163
Fig. 3.62: Workflow per la visualizzazione dei vincoli direttamente nei modelli BIM	163
Fig. 3.63: Workflow open source per la visualizzazione dei vincoli	164
Fig. 4.1: Curva di McLeamy (fonte: www.vectorworks.net)	167

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1.1: Software di Facility Management	51
Tab. 1.2: Confronto tra piattaforme IoT utilizzate per la gestione e l'analisi di dati provenienti da sensori	54
Tab. 1.3: Approfondimento articoli selezionati	65
Tab. 2.1: UNI EN ISO 19650	77
Tab. 2.2: UNI 11337	79
Tab. 2.3: Normative e decreti inerenti al BIM	82
Tab. 2.4: Normative conservazione del patrimonio artistico-culturale	84
Tab. 2.5: Normative in ambito energetico	87
Tab. 2.6: Casi studio	99
Tab. 3.1: Proprietà del dizionario bSDD - IoT	112
Tab. 3.2: Property Set consigliato per esprimere in formato IFC la scheda di intervenibilità per superfici ed elementi interni	127
Tab. 3.3: Property Set consigliato per esprimere in formato IFC la scheda di intervenibilità per i prospetti	128
Tab. 3.4: Codifica degli interventi	159
Tab. 4.1: Confronto tra approccio BIM ed HBIM	169

La presente ricerca è stata finanziata dall'Unione europea - Next Generation EU, Missione 4 Componente 1 CUP F73C22000740001 Finanziamento PNRR - DM 351/2022.



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA