



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea Luglio 2025

**Analisi e applicazione di metodologia
openBIM nell'ambito della certificazione
energetica**

Relatori:

Prof.ssa Ing. Francesca Maria Ugliotti

Candidata:

Hilary Marianella Trigoso Zulueta

Corralatore:

Elisa Stradiotto

Azienda:

EDILCLIMA srl

ABSTRACT

Il settore delle costruzioni è attualmente soggetto a due transizioni principali: la transizione digitale e la transizione energetica. L'incremento della normativa europea in direzione della decarbonizzazione del patrimonio edilizio, in concomitanza con l'adozione di strumenti digitali quali il Building Information Modeling (BIM), pone in evidenza la necessità di una gestione più integrata e interoperabile dei dati energetici degli edifici. In tale contesto, la presente tesi si inserisce con l'obiettivo di colmare una lacuna pratica concreta: l'assenza di un flusso operativo automatizzato per integrare i dati energetici certificati dell'Attestato di Prestazione Energetica (APE), in formato eXtensible Markup Language (XML), all'interno dei modelli informativi BIM, in formato Industry Foundation Classes (IFC). Questo lavoro di ricerca è stato sviluppato nell'ambito del progetto GEEDI acronimo di Gestione Energetica degli Edifici attraverso processi di Data Analysis e Building Information Modelling, un'iniziativa finanziata dal PNRR (Piano Nazionale di Recupero e Resilienza) e orientata alla trasformazione digitale e sostenibile della gestione del patrimonio edilizio. GEEDI mira alla creazione di una piattaforma digitale interoperabile che supporti processi di riqualificazione e manutenzione energetica, offrendo strumenti avanzati per la mappatura, la simulazione e il monitoraggio dei dati, e analizzando anche la possibilità di integrare e consultare in maniera strutturata gli APE tramite modelli OpenBIM. La proposta elaborata si basa sulla definizione di una metodologia openBIM per la fusione semantica tra file XML e IFC, mediante la creazione di mappature sistematiche tra gli elementi energetici certificati e le entità previste dallo standard IFC. L'intero processo è stato concepito per essere scalabile, trasparente e conforme alle più recenti direttive europee (EPBD 2023), che promuovono l'utilizzo del Digital Building Logbook (DBL) e del Building Renovation Passport (BRP) come strumenti cardine per la riqualificazione degli edifici esistenti. La metodologia è stata sottoposta a validazione tramite tre scenari operativi: l'analisi dei limiti dell'esportazione IFC standard, un'integrazione manuale dei dati APE all'interno del software Revit, e infine un approccio automatizzato tramite il visualizzatore openBIM GEEDI. Lo sviluppo di tale tecnologia, realizzato in collaborazione con partner di ricerca, ha dimostrato la capacità di associare automaticamente e correttamente i dati energetici alle entità IFC, generando modelli digitali arricchiti e pronti per essere utilizzati nei processi di simulazione e gestione energetica. I risultati ottenuti confermano la fattibilità tecnica della proposta e ne evidenziano i vantaggi in termini di riduzione dei tempi, eliminazione degli errori manuali e miglioramento dell'interoperabilità tra strumenti. Il lavoro dimostra come l'APE, da documento statico, possa trasformarsi in una risorsa digitale attiva e integrabile nel ciclo di vita dell'edificio. Le prospettive future riguardano l'estensione della metodologia ad altri contesti normativi regionali, il potenziamento del visualizzatore GEEDI con logiche di intelligenza artificiale e l'adozione sistematica di questo flusso nei processi pubblici di gestione del patrimonio edilizio, contribuendo così a una transizione digitale ed energetica più efficiente, strutturata e sostenibile.

ABSTRACT (EN)

The construction sector is currently undergoing two major transitions: the digital transition and the energy transition. The increase in European legislation aimed at decarbonising the building stock, together with the adoption of digital tools such as Building Information Modelling (BIM), highlights the need for more integrated and interoperable management of building energy data. In this context, this thesis aims to fill a practical gap: the absence of an automated operational flow to integrate certified energy data from the Energy Performance Certificate (EPC), in eXtensible Markup Language (XML) format, into BIM information models, in Industry Foundation Classes (IFC) format. This research work was developed as part of the GEEDI project, which stands for Energy Management of Buildings through Data Analysis and Building Information Modelling processes, an initiative funded by the PNRR (National Recovery and Resilience Plan) and aimed at the digital and sustainable transformation of building management. GEEDI aims to create an interoperable digital platform that supports energy redevelopment and maintenance processes, offering advanced tools for mapping, simulation and data monitoring, and also analysing the possibility of integrating and consulting APEs in a structured manner through OpenBIM models. The proposal is based on the definition of an openBIM methodology for the semantic fusion of XML and IFC files, through the creation of systematic mappings between certified energy elements and the entities provided for by the IFC standard. The entire process has been designed to be scalable, transparent and compliant with the latest European directives (EPBD 2023), which promote the use of the Digital Building Logbook (DBL) and the Building Renovation Passport (BRP) as key tools for the renovation of existing buildings. The methodology was validated through three operational scenarios: analysis of the limitations of standard IFC export, manual integration of APE data into Revit software, and finally an automated approach using the openBIM GEEDI viewer. The development of this technology, carried out in collaboration with research partners, demonstrated the ability to automatically and correctly associate energy data with IFC entities, generating enriched digital models ready for use in simulation and energy management processes. The results obtained confirm the technical feasibility of the proposal and highlight its advantages in terms of time reduction, elimination of manual errors, and improved interoperability between tools. The work demonstrates how the APE, from a static document, can be transformed into an active digital resource that can be integrated into the building's life cycle. Future prospects include extending the methodology to other regional regulatory contexts, enhancing the GEEDI viewer with artificial intelligence logic, and systematically adopting this flow in public building management processes, thus contributing to a more efficient, structured, and sustainable digital and energy transition.

SOMMARIO

ABSTRACT	0
ABSTRACT (EN)	1
INTRODUZIONE	4
1. STATO DELL'ARTE	8
1.1 La direttiva EPBD.....	8
1.1.1 DBL	10
1.1.2 APE.....	15
1.1.3 XML	18
1.2 BIM e BEM: Dalle definizioni all'integrazione pratica.....	20
1.2.1 BIM.....	21
1.2.2 Interoperabilità	23
1.2.3 Formati aperti	27
1.2.4 BEM	35
1.2.5 Interoperabilità tra BIM e BEM	37
2. METODOLOGIA.....	39
2.1 Strategia metodica.....	40
2.2 GEEDI	41
2.3 Caso studio.....	43
3. ANALISI APE.....	52
3.1 Identificazione caratteristiche APE.....	52
3.2 Classificazione dati	56
3.3 Filtraggio dati.....	59
4. DEFINIZIONE METODOLOGIA OPENBIM.....	60
4.1 Mappatura XML-IFC.....	61
4.2 Definizione codifiche IFC.....	62
4.3 Risultati Mappatura.....	66
5. VALIDAZIONE METODOLOGIA	70

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica

5.1	Processo di validazione.....	71
5.1.1	Validazione IFC.....	73
5.1.2	Validazione XML.....	97
	RISULTATI	111
	Punti di attenzione e sviluppi futuri.....	113
	CONCLUSIONI.....	115
	ACKNOWLEDGMENTS	116
	RINGRAZIAMENTI	117
	ACRONIMI.....	121
	INDICE FIGURE	123
	INDICI TABELLE.....	127
	BIBLIOGRAFIA.....	128
	ALLEGATO A.....	134

INTRODUZIONE

Attualmente, il tema del cambiamento climatico ha acquisito una rilevanza significativa, considerata una delle principali minacce per il pianeta, con impatti sempre più evidenti, tra cui eventi meteorologici estremi, scioglimento dei ghiacciai, innalzamento del livello del mare e perdita di biodiversità. La causa principale di tale fenomeno è attribuibile all'aumento delle emissioni di gas serra, specialmente l'anidride carbonica, derivante dall'uso di combustibili fossili come il carbone, il petrolio e il gas.

Dalle evidenze emerse da diverse ricerche e analisi, emerge che, oltre ai settori dei trasporti e dell'industria, anche il settore edile contribuisce in modo significativo a tali emissioni. *“Le emissioni del settore edilizio rappresentano circa un terzo delle emissioni totali del sistema energetico.”* [1]. Inoltre, si stima che il settore sia *“responsabile di quasi il 40% delle emissioni legate all'energia e ai processi”* [2]

La questione presenta diverse sfaccettature e origini. In primo luogo, la costruzione di edifici utilizzando materiali poco sostenibili è una pratica ampiamente diffusa. In secondo luogo, si osserva che il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici sono ancora fortemente dipendenti dalle fonti fossili. Inoltre, l'urbanizzazione in aumento, in particolare nei paesi dell'Asia e dell'Africa, aumenta la domanda di nuove costruzioni, spesso realizzate senza considerare adeguatamente criteri di efficienza energetica.

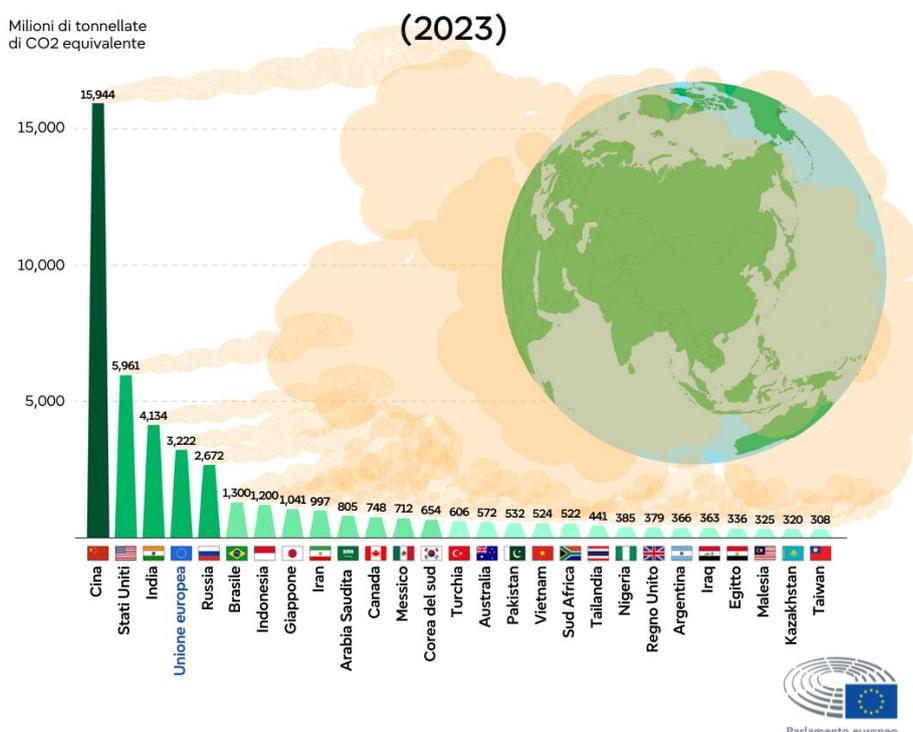


Figura 1 - Emissioni di gas serra nel mondo [Fonte: EDGAR]

Per tale ragione, organizzazioni internazionali come l'IPCC e l'ONU promuovono una transizione energetica che includa anche il settore delle costruzioni, con un focus su:

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica

- Edifici a zero emissioni (NZEB - Nearly Zero Energy Buildings);
- Materiali sostenibili (legno, calcestruzzi a basse emissioni, riciclo);
- Fonti rinnovabili integrate (solare termico, fotovoltaico, pompe di calore). [1]

In tale contesto, l'Unione Europea ha definito obiettivi ambiziosi, come la neutralità carbonica entro il 2050, come stabilito dal Green Deal europeo. Il settore edile riveste un ruolo di primo piano, in quanto:

- Il 75% degli edifici europei presenta un'efficienza energetica inferiore rispetto agli standard attuali (costruiti prima degli anni '90);
- Gli edifici sono responsabili del consumo del 40% dell'energia dell'Unione Europea e della produzione del 36% delle emissioni.

Per rispondere a tali sfide, l'Unione Europea ha aggiornato la Direttiva sulla Prestazione Energetica degli Edifici (*Energy Performance of Buildings Directive, EPBD*), culminata nella rifusione del 2023 e adottata ufficialmente nel 2024. Le recenti disposizioni legislative in ambito europeo si pongono l'obiettivo di ridurre le emissioni di carbonio nel settore dell'edilizia europea, promuovendo la costruzione di edifici a zero emissioni, incentivando la ristrutturazione energetica degli edifici esistenti e introducendo strumenti digitali per la gestione intelligente dei dati.

Tra gli strumenti digitali promossi dalla nuova direttiva, assume un ruolo di primo piano il Digital Building Logbook (DBL): un registro digitale dinamico che raccoglie e aggiorna tutte le informazioni rilevanti relative a un edificio, dal progetto alla gestione. L'ultima definizione del DBL lo descrive come *"un archivio comune per tutti i dati edilizi rilevanti, compresi i dati relativi alle prestazioni energetiche come certificati di prestazione energetica, passaporti di ristrutturazione e indicatori di prontezza intelligente, nonché sul potenziale di riscaldamento globale (GWP) del ciclo di vita e sulla qualità ambientale interna, che facilita il processo decisionale informato e la condivisione di informazioni all'interno del settore delle costruzioni, tra proprietari e occupanti di edifici, istituzioni finanziarie e autorità pubbliche"* [3].

Il DBL è concepito per interagire con altri strumenti, come gli Energy Performance Coefficient (EPC o APE) e i Building Renovation Passports (BRP), supportando la gestione integrata, il processo decisionale e la tracciabilità delle prestazioni edilizie lungo l'intero ciclo di vita. L'EPC potrebbe dunque rivelarsi uno *"strumento appropriato per fornire consigli sulle opportunità di ristrutturazione in modo personalizzato e comprensibile"* [4]. Tuttavia, attualmente, tali attestati non sono concepiti per tale scopo e, di conseguenza, non sono in grado di offrire tali informazioni ai consumatori. Inoltre, l'EPC viene spesso trattato come un documento statico, generalmente in formato PDF, privo di connessioni dinamiche con modelli digitali o database energetici. Tale limitata interoperabilità riduce il valore informativo e operativo, ostacolando la transizione verso un ecosistema edilizio basato sui dati. Per superare tale criticità, diventa

fondamentale sviluppare metodologie che consentano l'integrazione strutturata dei dati APE all'interno dei modelli IFC, lo standard aperto di riferimento nel mondo BIM.

Parallelamente, si è consolidato l'utilizzo del BIM come approccio innovativo alla digitalizzazione del settore delle costruzioni. Esso permette la modellazione parametrica tridimensionale e l'integrazione di dati geometrici, tecnici, impiantistici ed energetici in un unico ambiente interoperabile. In tale contesto, l'integrazione tra il BIM e l'EPBD rappresenta un ambito strategico per la trasformazione digitale e sostenibile del settore edilizio.

Tuttavia, permangono ancora numerose criticità in termini di interoperabilità tra i modelli IFC esportati dai software di authoring BIM e gli strumenti di modellazione energetica degli edifici (BEM). In molti casi, i dati importati nei software di simulazione risultano incompleti o scorretti. Analogamente, i risultati delle analisi energetiche, che potrebbero costituire parte integrante della documentazione tecnica e essere collegati al modello nel Common Data Environment (CDE), non vengono attualmente esportati all'interno del modello IFC prodotto dai software BEM. In altre parole, il modello viene utilizzato dai software BEM esclusivamente per l'esecuzione delle simulazioni, ma i risultati non vengono reintegrati nel modello IFC dell'edifici [5].

In tale ambito si inserisce il progetto GEEDI (*Gestione Energetica degli Edifici attraverso processi di Data Analysis e Building Information Modeling*), un'iniziativa sperimentale sviluppata nell'ambito dello Spoke 4 dell'ecosistema NODES, finanziato dal PNRR. GEEDI è un prototipo di piattaforma digitale aperta e interoperabile, orientata alla riqualificazione energetica e alla gestione intelligente degli edifici, con particolare attenzione al contesto montano. Il progetto, coordinato da Edilclima e realizzato in collaborazione con altri enti, tra cui il laboratorio Drawing TO the Future del Politecnico di Torino, integra tecnologie OpenBIM, intelligenza artificiale e banche dati territoriali per fornire strumenti decisionali avanzati.

Tra i servizi offerti dalla piattaforma, si distinguono: l'analisi territoriale, il benchmarking energetico, gli scenari di retrofit, il BRP, il DBL e il visualizzatore IFC/XML. Il presente elaborato si focalizza principalmente su quest'ultimo, proponendo una strategia di integrazione tra il modello IFC e i dati APE come strumento per il popolamento semiautomatico del DBL.

Il contributo di questa ricerca si inserisce nel contesto delle politiche europee per l'edilizia sostenibile, con l'obiettivo di proporre una soluzione scalabile, interoperabile e open-source, potenzialmente utile per progettisti, pubbliche amministrazioni ed enti certificatori. L'obiettivo finale consiste nel promuovere l'evoluzione dell'APE, da documento statico a nodo attivo in un ecosistema digitale, contribuendo così alla transizione energetica e digitale del patrimonio edilizio italiano, in linea con le scadenze del 2030 e del 2050.

Tutti questi processi saranno analizzati nella tesi che è strutturata nel seguente modo:

INTRODUZIONE

In questo capitolo si andrà a introdurre il contesto e la struttura della tesi.

- Introduzione dell'ambito della tesi;
- Obiettivo;
- Struttura della tesi

Analisi critica e approfondimento dello stato dell'arte e delle principali tematiche di riferimento.

- Direttiva EPBD;
- BIM e BEM;

STATO DELL'ARTE

1

2

METODOLOGIA

Descrizione della metodologia di riferimento e del percorso analitico che sarà seguito nei capitoli seguenti.

- Schema metodologico;
- GEEDI;
- Caso studio.

3

ANALISI APE

Si va ad analizzare il documento APE per andare a individuare strategie e vincoli per l'associazione con il formato IFC.

- Identificazione caratteristiche APE;
- Classificazione dati;
- Filtraggio dati.

Si va a spiegare il processo di mappatura dei dati proveniente dall'APE con i parametri IFC.

- Mappatura XML-IFC;
- Definizione codifiche IFC;
- Risultati mappatura.

DEF. METODOLOGIA OPENBIM

4

5

VALIDAZIONE METODOLOGIA

Si va a spiegare il processo di applicazione della metodologia nel caso studio.

- Validazione IFC;
- Validazione XML.

RISULTATI

Il capitolo si concentra sull'analisi critica dei risultati ottenuti e delle principali criticità emerse a seguito delle attività descritte nel Capitolo 4.

1. STATO DELL'ARTE

Il presente capitolo si prefigge di fornire una panoramica dei principali concetti teorici e operativi che costituiscono la base metodologica del presente elaborato. Si evidenzia che i temi centrali su cui verteranno gli approfondimenti includono la direttiva EPBD, il BIM, i formati di scambio dati aperti, gli standard di interoperabilità e l'APE. L'analisi degli strumenti oggi impiegati per migliorare l'organizzazione, la condivisione e l'utilizzo dei dati nel settore delle costruzioni sarà parte integrante dell'evento.

L'obiettivo di questa tesi è delineare il contesto tecnologico e normativo in cui si inseriscono le metodologie OpenBIM e la loro capacità di generare flussi di lavoro integrati, finalizzati al collegamento strutturato tra i dati dell'Attestato di Prestazione Energetica (APE) e le entità IFC dei modelli informativi. Tale integrazione rappresenta una sfida cruciale per la digitalizzazione del patrimonio edilizio e per la costruzione di un ecosistema informativo interoperabile, riutilizzabile e orientato alla sostenibilità.

1.1 La direttiva EPBD

La lotta ai cambiamenti climatici rappresenta una delle principali sfide del nostro tempo e l'Unione Europea ha risposto con un pacchetto normativo sempre più ambizioso alla decarbonizzazione dell'economia. Al fine di conseguire tale risultato, sono stati implementati numerosi accorgimenti che hanno interessato diversi ambiti, tra cui il sistema di scambio di quote di emissione per il settore industriale, il settore dei trasporti, e il settore energetico.

All'interno di questo quadro strategico, il settore edile emerge come una delle principali aree di intervento: gli edifici sono responsabili del 40% del consumo energetico e del 36% delle emissioni di gas serra in Europa.

Con l'approvazione della Legge europea sul clima, il Parlamento europeo ha stabilito nuovi obiettivi vincolanti:

“Per andare a contrastare i cambiamenti climatici, il parlamento europeo ha approvato la legge europea sul clima, che va ad innalzare l'obiettivo di ridurre le emissioni nette di gas serra almeno del 55% entro il 2030 (dall'attuale 40%) e rende giuridicamente vincolante la neutralità climatica entro il 2050.” [6].

In tale contesto, l'edilizia riveste un ruolo centrale. Le politiche europee sono orientate alla trasformazione strutturale del patrimonio edilizio esistente, promuovendo edifici ad altissima efficienza e a emissioni zero. La Direttiva sulla Prestazione Energetica degli Edifici (EPBD) rappresenta lo strumento normativo di maggiore rilevanza a livello europeo per la promozione dell'efficienza energetica dell'edilizia.

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica

La suddetta direttiva è stata introdotta nel 2002 e successivamente soggetta a revisioni periodiche, l'ultima revisione è stata formalmente adottata nell'aprile 2024. Gli obiettivi primari includono:

- Tutti i nuovi edifici dovranno essere a emissioni zero entro il 2030;
- Gli edifici esistenti dovranno essere riqualificati per raggiungere emissioni zero entro il 2050.

Tra le innovazioni introdotte nelle ultime versioni della direttiva, si evidenziano:

- L'obbligatorietà dell'APE per la compravendita e locazione di edifici;
- L'introduzione del concetto di NZEB (Nearly Zero-Energy Building), obbligatorio per le nuove costruzioni dal 2021;
- La promozione dei passaporti per la riqualificazione energetica BRP, che sono piani personalizzati per la riqualificazione energetica di lungo termine;
- L'adozione di strumenti digitali come il DBL per la gestione delle informazioni energetiche lungo il ciclo di vita dell'edificio.

L'aggiornamento del 2023 avviene nell'ambito del pacchetto legislativo "Fit for 55", con l'obiettivo di accelerare il tasso di ristrutturazione degli edifici esistenti e promuovere la transizione verso un parco edilizio a emissioni zero entro il 2050. *"La proposta mirava ad accelerare i tassi di ristrutturazione degli edifici, ridurre le emissioni di gas serra e il consumo energetico e promuovere l'utilizzo di energie rinnovabili negli edifici"* [7]. La direttiva pone l'accento su diversi aspetti, quali l'armonizzazione dei criteri di calcolo per la prestazione energetica, l'integrazione di indicatori di circolarità e sostenibilità e l'uso di tecnologie digitali per la raccolta e la gestione dei dati energetici, come il BIM e l'IFC.

La proposta, presentata dalla Commissione nel 2021, ha ricevuto l'approvazione politica del Parlamento e del Consiglio nel dicembre 2023, ed è stata ufficialmente adottata nell'aprile 2024.

L'implementazione della direttiva varia significativamente da uno Stato membro all'altro:

- In Germania, Olanda e Danimarca, l'EPBD è stata implementata con maggior rigore e l'approccio è fortemente integrato con metodologie digitali, certificazioni avanzate (come Passivhaus o BREEAM negli UK) e incentivi fiscali per la riqualificazione;
- In Italia, la direttiva è stata recepita con il D.Lgs. 192/2005, ma l'attuazione risulta disomogenea per via della competenza regionale. Tra gli ostacoli rilevanti si segnalano:
 - Frammentazione normativa regionale;
 - Scarsa interoperabilità digitale tra APE e i modelli BIM;
 - Utilizzo limitato dell'APE come strumento progettuale, spesso considerato solo un adempimento formale.

Nonostante le difficoltà riscontrate, alcune regioni, tra cui la Lombardia e l'Emilia-Romagna, stanno implementando soluzioni tecnologiche più avanzate, sviluppando piattaforme digitali per l'aggregazione e l'analisi dei dati energetici, in conformità con le direttive europee.

1.1.1 DBL

Il DBL rappresenta uno degli strumenti più innovativi introdotti a livello europeo nell'ambito della direttiva EPBD e della Renovation Wave Strategy, con l'obiettivo di supportare la digitalizzazione e la decarbonizzazione del settore edilizio.

“L'azione prevista per l'introduzione delle DBL, che era stata espressa in diverse comunicazioni, si è infine tradotta nella loro definizione all'interno della Direttiva sulla prestazione energetica degli edifici (EPBD). Nel 2021 la Commissione ha pubblicato la sua proposta e nell'aprile 2024 è stato adottato il testo finale” [8].

La definizione ufficiale di questo strumento è stata formalmente integrata nel quadro normativo europeo con l'approvazione della Direttiva UE 2024/1275, in cui il DBL viene identificato come un archivio digitale dinamico e interoperabile, con tre funzioni principali:

- Raccolta dei dati tecnici ed energetici relativi a un edificio (*data repository*);
- Facilitare il processo decisionale (*decision support*);
- Promuovere la trasparenza e la condivisione delle informazioni tra gli stakeholder coinvolti (*communication and sharing tool*).

“Il modello di dati semantici della DBL comprende due componenti chiave: un'ontologia che specifica i concetti e le interrelazioni e un dizionario che fornisce la terminologia e le definizioni. Si tratta di un modello di base volontario, incentrato su edifici, unità immobiliari e particelle catastali, mentre esclude le infrastrutture” [9].

Il DBL si configura pertanto come una piattaforma digitale centralizzata in grado di raccogliere, archiviare e aggiornare in modo strutturato un insieme eterogeneo di informazioni tra cui:

- Dati energetici (APE, consumi storici, prestazioni degli impianti);
- Interventi di manutenzione e ristrutturazione (con relative schede tecniche);
- Documentazione legale (permessi, certificazioni, collaudi);
- Modelli BIM e dataset geometrici (formati IFC, COBie);
- Dati provenienti da sensori IoT (monitoraggio in tempo reale).

Il concetto alla base è la creazione di un **Digital Twin** dell'edificio, ovvero un “gemello digitale” in grado di affiancare il bene costruito durante tutto il suo ciclo di vita, migliorando la gestione operativa,

la programmazione della manutenzione, la valutazione degli investimenti e la progettazione di interventi di riqualificazione.



Figura 2 – Tipologia di informazioni contenute nel DBL [10]

La strategia Renovation Wave riconosce il DBL come strumento chiave per l'integrazione dei dati nelle fasi di costruzione, utilizzo, riqualificazione e dismissione. Esso si allinea anche ai principi dell'economia circolare promossi dall'UE, promuovendo la tracciabilità dei materiali, la riduzione della dispersione informativa e il miglioramento della resilienza climatica.

“La rifusione della Direttiva EPBD 2024 introduce formalmente i registri digitali degli edifici nel quadro politico dell'UE, fornendone una definizione. La definizione di DBL include tre funzioni principali del concetto: è un archivio di dati, un aiuto alle decisioni e uno strumento per la condivisione delle informazioni” [10].

Inoltre secondo quanto stabilito dalla direttiva:

“Un registro digitale dell'edificio è un archivio comune per tutti i dati rilevanti dell'edificio. Facilita la trasparenza, la fiducia, il processo decisionale informato e la condivisione delle informazioni all'interno del settore edile, tra proprietari e occupanti di edifici, istituzioni finanziarie e autorità pubbliche. Un registro digitale degli edifici è uno strumento dinamico che consente di registrare, accedere, arricchire e organizzare in categorie specifiche una serie di dati, informazioni e documenti. Rappresenta una registrazione dei principali eventi e cambiamenti nel corso del ciclo di vita di un edificio.” [11]

Il DBL dovrebbe:

- Integrarsi con modelli IFC per estrarre automaticamente dati geometrici e materici;
- Collegarsi a un documento come l’APE per monitorare le prestazioni;
- Supportare le strategie di retrofit e gestione energetica.

Un sondaggio europeo ha evidenziato come il 64% degli utenti consideri “molto importante” l’integrazione automatica dei dati BIM/3D all’interno di tali strumenti, confermando il ruolo strategico del BIM nei futuri ecosistemi digitali.

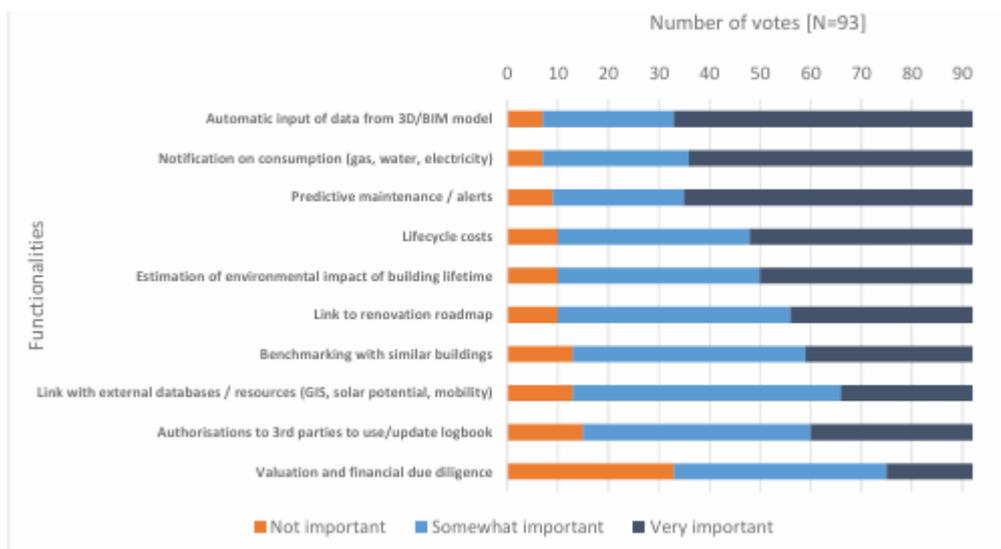


Figura 3 - Sondaggio funzionalità DBL [11]

IMPLEMENTAZIONE EUROPEA E INIZIATIVE NAZIONALI

Nonostante la sua importanza strategica, l’adozione del DBL **non è obbligatoria** per gli Stati membri: la sua implementazione è lasciata alla discrezione nazionale e spesso è condizionata dalla disponibilità di strumenti digitali e database strutturati.

Secondo quanto riportato nel report della Commissione Europea (2020) intitolato “Studio sullo sviluppo di un quadro dell’Unione Europea per gli edifici” [12], attualmente sono presenti circa 34 iniziative attive o in fase di sviluppo legate al DBL, con diversi livelli di maturità. La tabella seguente illustra alcuni casi significativi:

n	DBL	Paese	Organizzazione	Tipologia	Tipo di edificio	Obbligatorio/volontario
1	Arc platform	USA	US Green Building Council (USGBC) and Green Building Certification Inc (GBCI)	Digitale	Tutti i tipi di edificio	Volontario
2	BASTA loggbok	Svezia	BASTA non-profit company	Cartaceo	Tutti i tipi di edificio	Volontario

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica

3	Min Villa	Svezia	Villaagarnas Riksförbund	Digitale	Case individuali	Volontario
4	Produktkollen	Svezia	ProduktKollen AB	Digitale	Tutti i tipi di edificio	Volontario
5	Klimatdeklaration	Svezia				
6	Bedrebolig	Danimarca	The Danish Energy Agency	Cartaceo	Residenziale	Volontario
7	CIBSE TM31	UK	Chartered Institution of Building Services Engineers	Cartaceo	Uffici, edifici pubblici e industriali	Obbligatorio
8	HomeInformation Pack(HIP)	UK				
9	Home report	Scozia (UK)	Scottish Government	Cartaceo	Case individuali	Obbligatorio
10	Dossier d'intervention ultérieure	Belgio	Belgian Federal Government	Cartaceo	Residenziale	Obbligatorio
11	Woningpas	Flandre (Belgio)	Flemish Energy Agency (VEA), Public Waste Agency of Flanders (OVAM), Environment and Housing Departments Flemish Government	Digitale	Residenziale	Obbligatorio
12	Eigenheim Manager	Germania	Eigenheim Manager	Digitale	Tutti i tipi di edificio	Volontario
13	Gebaudepass	Germania	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (BMVBW)	Digitale	Case individuali	Volontario
14	Hausakte	Germania	Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen	Digitale	Case individuali	Volontario
15	QDF Hausakte	Germania	Bundesverband Deutscher Fertigbau e.V.	Cartaceo	Case individuali	Obbligatorio
16	ImmoPass	Germania	HypoVereinsbank and Dekra			
17	Fascicolo del Fabbricato	Italia	Regional Government based on national requirement	Cartaceo	Edifici pubblici	Volontario
18	Federal Register of Buildings and Dwellings	Svizzera	Federal Statistical Office (FSO)	Digitale	Tutti i tipi di edificio	Obbligatorio
19	Libro del Edificio	Spagna	Regional Government based on national requirement	Cartaceo	Residenziale	Obbligatorio
20	PAS-E	Spagna	Cíclica, Green Building Council España			
21	Livro de obra	Portogallo	Ministry of Environment, Territorial Planning and Regional Development, and Ministry of Public Works, Transportation and Communication.	Cartaceo	Residenziale, uffici ed edifici industriali	Obbligatorio
22	Madaster	Paesi bassi	Madaster Foundation	Digitale	Tutti i tipi di edificio	Volontario

23	Opleverdossier	Paesi bassi	Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (Ministry of Internal Affairs)	Cartaceo	Residenziale	Volontario
24	Platform CB'23	Paesi bassi				
25	Property Register	Islanda	Registers Iceland	Digitale	Tutti i tipi di edificio	Obbligatorio
26	Real estate service manual	Filandia	Government/Ministry of Environment	Cartaceo	Tutti i tipi di edificio	Obbligatorio
27	Building Passport GBC	Filandia	Green Building Council			
28	Ilmastoviisaat Taloyhtiöt	Filandia	GBC Finland in partnership with private companies			
29	Electronic building ID	Grecia	Greek Government	Digitale	Tutti i tipi di edificio	Obbligatorio
30	Homebook	Francia				
31	Le carnet numérique du logement	Francia	Housing ministry	Digitale	Edifici pubblici e privati	Volontario
32	Wikihabitat	Francia	Novabuilt	Digitale	Edifici pubblici e privati	Volontario
33	Mon carnet logement	Francia	DIGILOGEMENT	Digitale	Residenziale	Obbligatorio dal 2013
34	Passeport Efficacité Énergétique	Francia	EDF	Digitale	Edifici pubblici e privati	Obbligatorio dal 2023

Tabella 1 - Esempi di DBL in Europa

Di seguito vengono presentati due casi emblematici di applicazione avanzata DBL in ambito europeo, in cui è evidente l'interazione tra il formato IFC e i dati dell'EPC, dimostrando la fattibilità di flussi informativi interoperabili e digitalizzati.

BIM Loket

Nei Paesi Bassi, l'integrazione tra DBL e metodologia OpenBIM ha raggiunto un elevato livello di maturità grazie a un ecosistema normativo e tecnologico avanzato. La piattaforma nazionale BIM Loket funge da repository centrale per i dati edilizi digitali. L'adozione obbligatoria del formato IFC nei progetti pubblici, introdotta già nel 2011, ha reso possibile la standardizzazione dei modelli e la loro consultazione mediante software open source come BIMserver.

Tra le funzionalità principali offerte si segnalano:

- La generazione automatica di EPC a partire dai modelli BIM attraverso il formato IFC;
- Il tracciamento della manutenzione predittiva, attraverso identificatori univoci dei componenti;
- L'integrazione con strumenti di simulazione energetica come EnergyPlus;
- Il collegamento a banche dati ambientali per la valutazione del ciclo di vita (LCA). [13]

Questa strategia ha condotto a risultati concreti, tra cui una riduzione del 40% nei tempi per il rilascio dei permessi edilizi e una maggiore affidabilità dei dati rispetto ai documenti tradizionali.

BIM4REN

Il progetto europeo BIM4REN (BIM for Renovation), finanziato nell'ambito del programma HORIZON 2020, rappresenta un esempio significativo di implementazione pratica dell'interoperabilità tra dati energetici e modelli BIM. Questo progetto dimostra come l'integrazione tra queste due discipline possa portare a risultati concreti e rilevanti per il settore dell'energia e del costruire. Il progetto si prefigge di fornire supporto alla digitalizzazione dei processi di riqualificazione energetica degli edifici residenziali esistenti, mediante l'implementazione di strumenti BIM e OpenBIM concepiti per essere accessibili anche alle piccole e medie imprese, che rappresentano la maggioranza degli operatori del settore.

L'approccio metodologico adottato si sviluppa attraverso una serie di fasi: la raccolta dei dati preliminari, la generazione del modello "as-built", la simulazione energetica, la definizione di scenari di retrofit e la validazione tecnica degli interventi. Tutte le operazioni sono rese possibili tramite una piattaforma unica denominata OSAP (One Stop Access Platform) [14], che raccoglie strumenti interoperabili per la generazione, l'arricchimento e l'analisi dei modelli BIM, tra cui *Plans2BIM*, *LodLifter*, *Renovation Manager* e *BIMSolar*.

L'integrazione tra il modello IFC e i dati dell'APE o EPC rappresenta un'innovazione significativa nel campo della gestione dei dati. L'impiego degli standard openBIM, in particolare l'IFC, è centrale per garantire l'interoperabilità tra gli stakeholder e i software: "Per garantire l'interoperabilità, l'uso di standard aperti come Industry Foundation Classes (IFC) è di fondamentale importanza" [14]. Grazie a una serie di Property Set specifici, i modelli IFC vengono arricchiti con informazioni energetiche estratte o simulate, permettendo la generazione automatica di certificazioni digitali o la verifica dei requisiti minimi. I dati vengono mappati sulle entità IFC corrispondenti (es. *IfcBuilding*, *IfcSpace*, *IfcSystem*), con particolare attenzione rivolta alla compatibilità con lo standard OpenBIM.

La possibilità di fondere in un unico modello le informazioni geometriche e quelle prestazionali, in un formato aperto e leggibile da diversi software, rappresenta un importante avanzamento verso una progettazione energetica integrata e interoperabile, in linea con i requisiti della direttiva EPBD 2024.

1.1.2 APE

Il termine EPC viene comunemente utilizzato per indicare il certificato di prestazione energetica (in Italia, Attestato di Prestazione Energetica - APE), introdotto nel 2002 dalla Direttiva EPBD come requisito obbligatorio negli Stati membri dell'UE per la costruzione, vendita o locazione di edifici o unità abitative. Il certificato fornisce un quadro sintetico e trasparente delle prestazioni energetiche [15], comprendendo:

“L'EPC deve includere i requisiti energetici dell'edificio e valori di riferimento quali gli standard e i parametri di riferimento attuali. Allo stesso tempo, il certificato deve essere accompagnato da raccomandazioni per un miglioramento energetico ottimale o efficiente in termini di costi”. [16]

Una volta rilasciato, l'EPC ha validità decennale, salvo modifiche rilevanti all'immobile. Con la rifusione della EPBD nel 2010, sono stati introdotti obblighi aggiuntivi: l'indice energetico deve essere riportato negli annunci immobiliari e il certificato consegnato a nuovi acquirenti o locatari, rafforzandone il ruolo sul mercato.

L'EPC contribuisce inoltre a valorizzare gli immobili: gli edifici con migliori classi energetiche risultano più appetibili e sono venduti o affittati più velocemente a prezzi più alti.

Nel contesto dei flussi BIM to BEM, l'EPC rappresenta uno strumento strategico. Può:

- semplificare i dati di input per modelli energetici interoperabili;
- facilitare l'interscambio tra software e piattaforme openBIM (es. connessione tra modelli IFC e strumenti di simulazione).

L'EPC si configura come un elemento chiave per:

- la promozione di edifici a elevata efficienza energetica;
- il supporto alle decisioni per la riqualificazione;
- l'integrazione nei sistemi digitali per la gestione del ciclo di vita edilizio.

Il suo utilizzo è in espansione sia nella ricerca che nella pratica operativa, in linea con le strategie europee per la decarbonizzazione e la digitalizzazione del patrimonio edilizio.

INTEGRAZIONE EPC E DBL

Da diversi studi e fonti [11] [17] proviene il fatto che l'EPC o APE deve essere uno strumento utile da integrare all'interno del DBL ma anche del BRP.

“L'EPC dovrebbe preferibilmente alimentare automaticamente sia il BRP che il DBL” [17]

Tra tutti i dati che possono essere raccolti e gestiti all'interno del DBL importante raccogliere e integrare i certificati di prestazione energetica, poiché questi sono in grado non solo di definire le caratteristiche energetiche e prestazionali degli edifici, ma anche le caratteristiche generali dell'architettura e dei sistemi, come detto, precedente. Perciò gli APE svolgono un ruolo chiave nel promuovere i miglioramenti dell'efficienza energetica necessari per la transizione ecologica del settore edilizio.

L'integrazione degli EPC con soluzioni digitali, come il DBL e il BRP, ne migliora l'efficacia consentendo un monitoraggio continuo e facilitando la transizione verso un approccio più sostenibile. Nel quadro dell'integrazione dell'EPC, diversi progetti europei recenti [18, 19, 20], come iBRoad, X-Tendo e

ALDREN [42,43,44], hanno promosso l'integrazione con strumenti digitali avanzati come il DBL e il BRP. Il DBL, in particolare, supporta un approccio cooperativo e sinergico alla gestione dei dati, ottimizzando i flussi informativi tra EPC, BRP e ambienti BIM, migliorando la qualità dei dati, l'efficienza dei processi decisionali e la trasparenza complessiva del ciclo di vita dell'edificio.

CASO STUDIO iBROAD

Nell'ambito delle strategie europee per la decarbonizzazione del patrimonio edilizio esistente, il progetto *iBRoad* propone un modello integrato di gestione e pianificazione degli interventi di riqualificazione energetica profonda, basato sull'interazione strutturata e sinergica di tre strumenti fondamentali: EPC, il DBL e il BRP [18].

All'interno di questo framework, l'EPC svolge un ruolo primario in quanto rappresenta la fonte informativa principale a supporto del DBL. L'EPC fornisce una valutazione tecnica standardizzata delle prestazioni energetiche dell'edificio, basata su una raccolta sistematica di dati energetici e geometrici. Nel caso del database portoghese, ad esempio, ciascun EPC può contenere tra le 150 e le 300 variabili, includendo informazioni relative all'involucro edilizio, agli impianti tecnici, ai consumi e alla produzione di energia, alle emissioni di CO₂, nonché alle raccomandazioni tecniche per l'efficientamento [18].

L'integrazione operativa tra EPC, DBL e BRP permette di conseguire una serie di benefici strategici nel processo di gestione del patrimonio edilizio:

- Consente una visione olistica e continuamente aggiornata dell'edificio lungo tutto il suo ciclo di vita utile;
- Supporta l'automazione nella generazione di raccomandazioni progettuali, grazie all'interoperabilità con sistemi di monitoraggio e dispositivi intelligenti (es. smart metering, automazione);
- Facilita l'integrazione con gli ambienti BIM, migliorando il flusso di dati tra professionisti, software di modellazione e banche dati normative, e rafforzando la coerenza tra dati geometrici, energetici e gestionali;
- Promuove un coinvolgimento attivo degli stakeholder, pubblici e privati, nella raccolta, condivisione e valorizzazione dei dati: enti locali, fornitori di energia, istituzioni finanziarie, operatori del mercato immobiliare, tra gli altri.

Il modello proposto da *iBRoad* si basa inoltre su una struttura dati modulare e scalabile, suddivisa in una struttura "core" a livello europeo, conforme ai requisiti comuni stabiliti dalla Direttiva EPBD, e una componente flessibile a livello nazionale o regionale, che consente di adattare il sistema alle specificità locali (terminologie, sistemi catastali, normative, fonti dati), mantenendo al contempo la possibilità di armonizzazione e confronto tra paesi membri [18].

1.1.3 XML

L'XML (eXtensible Markup Language) è un meta-linguaggio definito dal W3C nel 1997, progettato per creare linguaggi specifici per domini applicativi diversi. Non si tratta di un linguaggio di programmazione, ma di un formato di rappresentazione dati strutturato, leggibile sia da umani sia da computer, ampiamente utilizzato per lo scambio e la memorizzazione di informazioni in maniera interoperabile e non proprietaria [21].

L'XML permette di definire tag personalizzati (ad esempio <Building>, <Wall>, <Window>) per modellare dati di specifici ambiti come il BIM, rappresentando la struttura e le proprietà degli edifici. La sua struttura è gerarchica e organizzata ad albero, con un elemento radice che include sotto-elementi e attributi, delimitati da tag di apertura e chiusura o tag vuoti. La flessibilità del linguaggio consente di adattarlo a diverse esigenze, ma richiede una progettazione accurata degli schemi per garantire coerenza semantica e compatibilità tra sistemi.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<utenti>
  <utente anni="20">
    <nome>Ema</nome>
    <cognome>Princi</cognome>
    <indirizzo>Torino</indirizzo>
  </utente>
  <utente anni="54">
    <nome>Max</nome>
    <cognome>Rossi</cognome>
    <indirizzo>Roma</indirizzo>
  </utente>
</utenti>
```

Figura 4 - Esempio scrittura XML

A differenza di EXPRESS (linguaggio su cui si basa IFC), le entità XML non sono rigidamente predefinite:

- EXPRESS: struttura rigida con attributi legati al modello dati;
- XML: struttura dinamica e flessibile, con rappresentazione gerarchica e annidata.

Questa differenza rende complessa una traduzione diretta tra modelli EXPRESS e schemi XML. Tuttavia, grazie alla possibilità di definire standard comuni come IFC-XML, XML viene largamente impiegato per l'interoperabilità tra software e piattaforme, per esempio nel collegamento tra modelli BIM e dati energetici APE o EPC.

Per migliorare l'interoperabilità, XML viene spesso integrato con:

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica

- XML Schema, per definire regole rigorose sulla struttura e validità dei dati;
- Mapping semantico, per chiarire il significato e l'uso dei dati nel dominio applicativo;
- Standard condivisi, come nel caso dell'IFC-XML per il settore edilizio.

Queste pratiche permettono di ridurre ambiguità e garantire uno scambio dati robusto e coerente tra applicazioni diverse, aspetto essenziale per processi come il BIM-to-BEM e per l'adozione di metodologie openBIM.

INTEGRAZIONE CON EPC E BIM

Negli ultimi anni, l'Unione Europea ha promosso un progressivo processo di armonizzazione gli EPC tra i diversi Stati membri, parallelamente a un'accelerazione nella digitalizzazione dei dati attraverso l'adozione di formati strutturati e interoperabili, come l'XML [22, 23]. Sebbene questo formato non costituisca un linguaggio di programmazione in senso stretto, esso definisce una grammatica estensibile che consente di modellare insiemi di dati personalizzati secondo le esigenze di scambio e archiviazione, rendendolo uno strumento particolarmente adatto per applicazioni nel settore delle costruzioni e della gestione energetica [24].

L'elevata flessibilità e leggibilità automatica dell'XML ha favorito la sua adozione su larga scala nei sistemi nazionali di gestione dell'EPC, contribuendo a creare le basi per una interoperabilità efficace con strumenti digitali avanzati, tra cui i modelli informativi dell'edificio (BIM) e i database normativi, come il DBL.

A livello europeo, diversi Stati membri hanno implementato soluzioni basate su XML nei rispettivi sistemi EPC, con modalità e gradi di centralizzazione differenti:

- In Grecia, il sistema nazionale EPC, gestito dal Ministero dell'Ambiente e dell'Energia, adotta un formato XML per la registrazione strutturata dei dati energetici [25];
- In Slovenia, il registro centrale EPC rende disponibili al pubblico i dati in un formato XML aperto, promuovendo la trasparenza e il riuso delle informazioni [26];
- In Croazia, il formato XML è impiegato per integrare automaticamente i dati energetici calcolati con il software EPC nel registro centrale nazionale, garantendo la coerenza tra calcolo, archivio e policy [27];
- In Ungheria, la piattaforma centrale gestita da LECHNER adotta uno schema XML standardizzato, a supporto della continuità dei flussi informativi tra software di calcolo e banche dati istituzionali [4];
- In Austria, con particolare riferimento alla regione di Salisburgo, i certificati energetici sono archiviati nel database ZEUS, dove ogni EPC è accompagnato da file XML per

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica

garantire l'integrità semantica dei dati e la loro compatibilità con gli strumenti software utilizzati [28];

- In Spagna, gli EPC sono gestiti a livello regionale ma seguono una struttura XML unificata con oltre 180 variabili, a supporto di una raccolta dati standardizzata e interoperabile tra regioni [29];
- In Italia, la gestione degli EPC è decentralizzata e prevede due versioni XML ufficiali, sviluppate dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) in collaborazione con varie amministrazioni regionali, per rispondere alle esigenze eterogenee del territorio nazionale [30].

Questi dataset strutturati in XML rappresentano oggi una base tecnica fondamentale per l'integrazione dei dati EPC nei modelli BIM. L'interoperabilità tra EPC, DBL e BIM consente una più efficace gestione e valorizzazione del patrimonio informativo durante l'intero ciclo di vita dell'edificio, dalla progettazione alla manutenzione, fino alle strategie di ristrutturazione e decarbonizzazione [31]. Inoltre, la standardizzazione semantica introdotta dall'XML consente di realizzare collegamenti bidirezionali tra banche dati energetiche e piattaforme BIM, facilitando l'adozione di modelli digitali integrati a supporto delle politiche europee per l'efficienza energetica.

1.2 BIM e BEM: Dalle definizioni all'integrazione pratica

Il crescente interesse per la digitalizzazione nel settore delle costruzioni e la necessità di una gestione più sostenibile ed efficiente del patrimonio edilizio hanno determinato un'attenzione centrale verso il tema dell'interoperabilità tra strumenti e metodologie diverse. In tale contesto, il BIM si configura come una risorsa strategica, in quanto consente di integrare e gestire in modo strutturato un'ampia quantità di dati relativi alla progettazione, costruzione e gestione di un edificio. Tali dati costituiscono un fondamento solido per strumenti innovativi quali il DBL e per applicazioni connesse al Building Energy Modeling (BEM), promuovendo un approccio integrato e orientato alla sostenibilità.

L'Europa si distingue a livello internazionale per il suo ruolo pionieristico nell'adozione di metodologie OpenBIM e nell'integrazione tra BIM e BEM, con l'obiettivo di ridurre il consumo energetico degli edifici e promuovere la transizione verso un patrimonio edilizio a basse emissioni. In tale contesto, l'integrazione tra BIM e BEM emerge come un'opportunità concreta per migliorare l'efficienza energetica, grazie alla combinazione delle informazioni geometriche e prestazionali contenute nei modelli digitali con i dati provenienti dai sistemi di monitoraggio e automazione (come i Building Management System - BMS - o i sensori dell'Internet of Things - IoT).

1.2.1 BIM

Il BIM non si limita a rappresentare un modello tridimensionale, ma definisce un processo digitale collaborativo che accompagna l'edificio durante l'intero ciclo di vita, dalla fase di progettazione alla costruzione, fino alla gestione e alla dismissione. La sua peculiarità principale risiede nella sua abilità di integrare dati geometrici, tecnici e prestazionali in un ambiente unico e condiviso tra tutti gli attori coinvolti: architetti, ingegneri, impiantisti e gestori.

Secondo la definizione fornita dal National Institute of Building Sciences, il BIM può essere inteso come una *"rappresentazione digitale delle caratteristiche fisiche e funzionali di un oggetto"* [32]. A differenza dei tradizionali software CAD, il BIM consente l'aggiunta di dimensioni informative ulteriori, quali il tempo (4D), i costi (5D) e i dati associati alle prestazioni energetiche e ambientali, inaugurando così un nuovo paradigma che apre la strada a simulazioni avanzate e gestione intelligente dell'opera.



Figura 5 – Ambiti applicazione BIM [33]

Il modello BIM si articola tipicamente in tre ambiti principali:

- BIM architettonico, che rappresenta il punto di partenza e il riferimento per le altre discipline. Integra materiali, volumi, caratteristiche estetiche e tecniche, e si evolve attraverso diversi livelli di dettaglio (LOD), dalla fase concettuale a quella esecutiva.
- BIM strutturale, che isola e sviluppa le informazioni legate agli elementi portanti, producendo elaborati tecnici e modelli tridimensionali utili per il cantiere e la prefabbricazione.
- BIM impiantistico (MEP), dedicato alla modellazione integrata dei sistemi meccanici, elettrici e idraulici, con una forte componente funzionale e prestazionale.

II BIM MEP

La modellazione MEP rappresenta una delle sfide più complesse nel processo BIM, perché richiede la gestione di reti tridimensionali (condotte, canalizzazioni, tubazioni, cavi) e di parametri tecnici fondamentali (portata, carichi termici, perdite di carico). L'adozione del BIM per la progettazione degli impianti offre vantaggi significativi:

- Coordinamento tridimensionale tra discipline;
- Controllo e verifica automatica dei parametri;
- Generazione di schemi e report;
- Simulazioni 4D per la pianificazione dell'installazione;
- Gestione del ciclo di vita e manutenzione predittiva.

Elemento chiave del modello MEP è l'uso di famiglie parametriche intelligenti, spesso fornite dai produttori, che permettono un'integrazione accurata dei componenti nel modello. L'interoperabilità è garantita tramite standard come l'IFC e l'integrazione con software specialistici (es. MagiCAD, EnergyPlus, IESVE) per simulazioni e verifiche, che consentono di evitare ridondanze, ridurre il rischio di errori e accelerare i flussi di lavoro.

Tradizionalmente, il BIM MEP è stato impiegato per la clash detection, ovvero la verifica automatica delle interferenze tra componenti impiantistici, strutturali e architettonici. Tuttavia, l'evoluzione tecnologica sta trasformando il modello MEP in un database tecnico dinamico e multidisciplinare, utile per:

- Simulazioni energetiche e prestazionali in tempo reale;
- Verifiche normative e calcoli fluidodinamici;
- Integrazione con sistemi di gestione intelligente degli edifici (BMS);
- Monitoraggio in tempo reale tramite sensori IoT e tecnologie Digital Twin.

In progetti di grandi dimensioni, quali ospedali e infrastrutture complesse, il BIM MEP trova impiego anche nella fabbricazione digitale, ovvero nella prefabbricazione, fornendo modelli dettagliati da cui è possibile dedurre le istruzioni per il taglio, il montaggio e l'assemblaggio dei componenti.

Il futuro del BIM è rappresentato dall'integrazione con sistemi IoT, BMS e Digital Twin, in un paradigma noto come BIM 4.0. In questo scenario il modello diventa un vero e proprio database dinamico, capace di:

- Monitorare in tempo reale le prestazioni dell'edificio;
- Supportare la pianificazione e la gestione della manutenzione;
- Abilitare simulazioni energetiche e ambientali avanzate;
- Gestire in modo intelligente il patrimonio edilizio.

Nonostante l'Italia presenti ancora un'adozione disomogenea di questi strumenti, si stanno diffondendo esempi virtuosi, in particolare nei settori ospedaliero e infrastrutturale. Per accelerare questa transizione è necessario puntare su:

- Formazione tecnica avanzata;
- Adozione di standard aperti e interoperabili;
- Integrazione sistematica con software di calcolo e piattaforme di gestione.

Come osservato da esperti del settore, *“l'integrazione di competenze MEP e BIM può rappresentare una sfida significativa, richiedendo investimenti in formazione, software e hardware specifici.”* [34]. Tuttavia, tali investimenti sono ormai imprescindibili per affrontare con successo la transizione digitale e sostenibile del comparto edilizio.

1.2.2 Interoperabilità

L'interoperabilità è un concetto cardine del BIM, poiché consente a sistemi e applicazioni diversi di comunicare e scambiare dati senza perdite o distorsioni. Come definito dal National Building Information Modeling Standard degli Stati Uniti, *“L'interoperabilità del software è uno scambio di dati senza soluzione di continuità a livello di software tra applicazioni diverse, ognuna delle quali può avere una propria struttura interna di dati. L'interoperabilità si ottiene mappando parti della struttura dati interna di ciascuna applicazione partecipante a un modello universale e viceversa.”* [35].

In ambito BIM, tale approccio implica che le informazioni generate durante una fase (ad esempio la progettazione architettonica) devono poter essere riutilizzate nelle fasi successive (come l'analisi strutturale o la gestione manutentiva), anche se gestite da software differenti. Questo garantisce continuità e coerenza dei dati lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio.

Al fine di promuovere l'interoperabilità nel settore delle costruzioni BuildingSMART, l'organizzazione internazionale no-profit che promuove l'adozione del BIM e degli standard aperti nel settore delle costruzioni, ha introdotto il concetto di OpenBIM e sviluppato gli standard aperti che ne sono alla base, tra cui il formato IFC. L'obiettivo dell'OpenBIM è superare le barriere imposte dai formati proprietari, mediante la creazione di un ambiente collaborativo fondato su dati aperti, neutrali e condivisi, in cui ogni attore può contribuire al modello informativo utilizzando il software più adeguato.

“I modelli openBIM possono essere definiti come informazioni digitali condivisibili del progetto che supportano la collaborazione continua per tutti i soggetti che partecipano al progetto e facilitano l'interoperabilità a favore dei progetti e dei beni per tutto il loro ciclo di vita.” [36]

È importante distinguere tra interoperabilità e compatibilità. La prima implica uno scambio naturale e integrato dei dati tra applicazioni diverse, mentre la seconda si verifica quando un sistema proprietario

viene forzato ad adattarsi a formati aperti. Il livello di interoperabilità è direttamente correlato alla maturità del BIM: un'elevata maturità si traduce in una maggiore capacità di scambio e gestione delle informazioni, con benefici significativi in termini di efficienza e riduzione dei costi progettuali.

È possibile distinguere i seguenti tipi di interoperabilità:

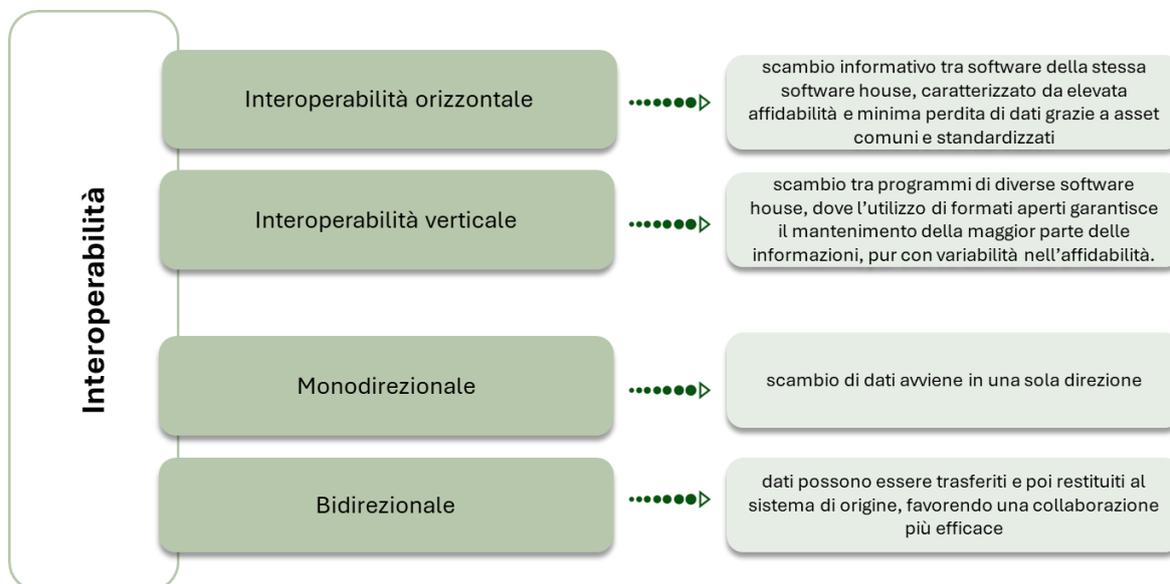


Figura 6 – Diverse modalità di scambio dati

APPROCCI: CLOSED BIM E OPEN BIM

Il flusso di scambio di dati tra i vari attori e i software è pertanto fondamentale per garantire la collaborazione e la qualità del progetto. In questo ambito si evidenziano due approcci distinti: Closed BIM e Open BIM.

Il closed BIM (o *lonely BIM*) è un approccio che prevede l'uso di formati proprietari, ossia file generati da un unico software BIM authoring. Questo metodo richiede che tutti i professionisti coinvolti nel progetto utilizzino lo stesso software e, talvolta, la stessa versione, limitando l'uso di formati di interscambio aperti come l'IFC. Tale scelta riduce la collaborazione con professionisti che utilizzano strumenti diversi, generando un sistema chiuso e poco flessibile. Questo approccio può offrire vantaggi in termini di velocità e integrazione tra moduli dello stesso software, ma comporta una significativa riduzione della flessibilità e della trasparenza dei dati.

L'approccio Open BIM si configura come una modalità operativa basata sull'interoperabilità tra le molteplici discipline specialistiche che intervengono lungo l'intero ciclo di vita di un'opera. Il suo obiettivo principale è quello di abbattere le barriere tecnologiche e comunicative che possano ostacolare il coordinamento e la collaborazione tra i professionisti del settore delle costruzioni. Per conseguire tale obiettivo, si rende indispensabile l'implementazione di sistemi di gestione del BIM Management System e l'adozione di processi standardizzati basati su formati aperti, che assicurano un flusso integrato,

accessibile e condiviso tra tutti gli attori coinvolti. Esso promuove un approccio collaborativo basato su standard aperti e non proprietari, migliorando la comunicazione tra i professionisti e apportando benefici all'intera filiera edilizia. Inoltre, è promosso da BuildingSMART International, con l'obiettivo di garantire un ambiente di lavoro più aperto, interoperabile e vantaggioso per tutti i professionisti del settore AEC.

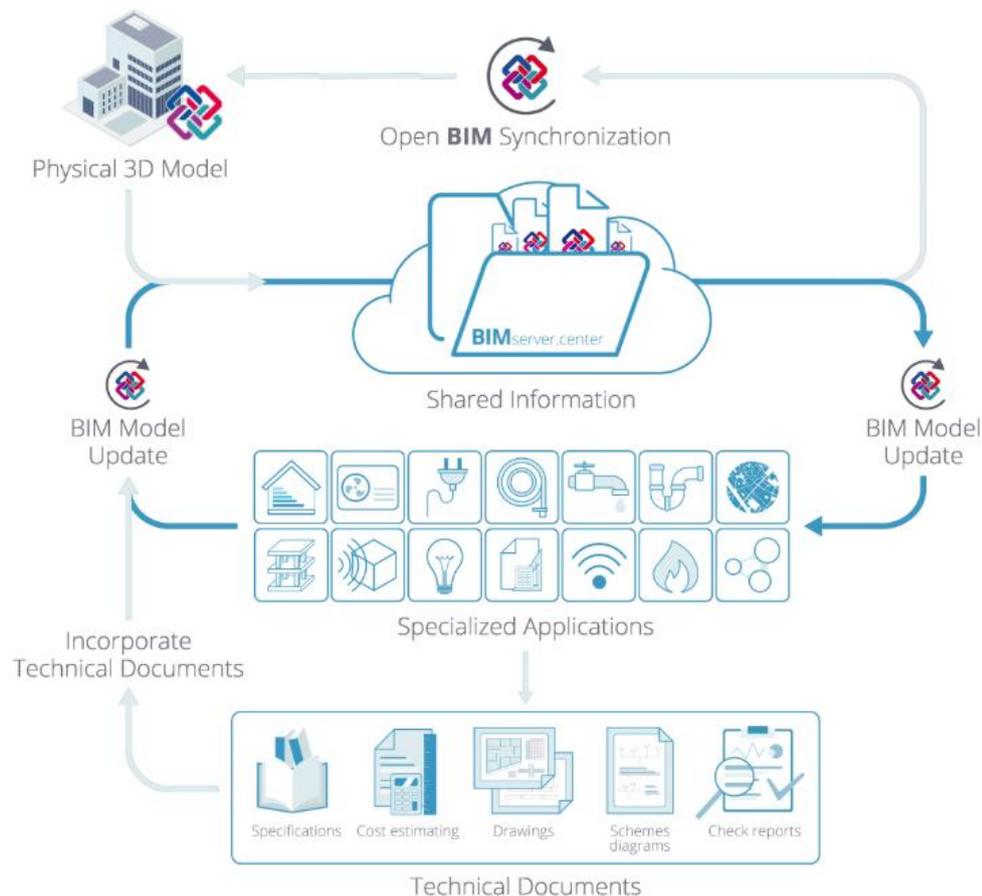


Figura 7 - Flusso OpenBIM [37]

STANDARD E SERVIZI OPENBIM

Per garantire l'interoperabilità e la cooperazione tra i diversi attori del settore delle costruzioni, l'approccio OpenBIM, promosso da buildingSMART International, si fonda su un insieme articolato di standard aperti. Questi standard non solo regolano il formato dei dati, ma anche i flussi informativi e i servizi digitali che ne supportano la gestione e l'uniformità semantica.

Gli standard openBIM si suddividono in tre categorie principali:

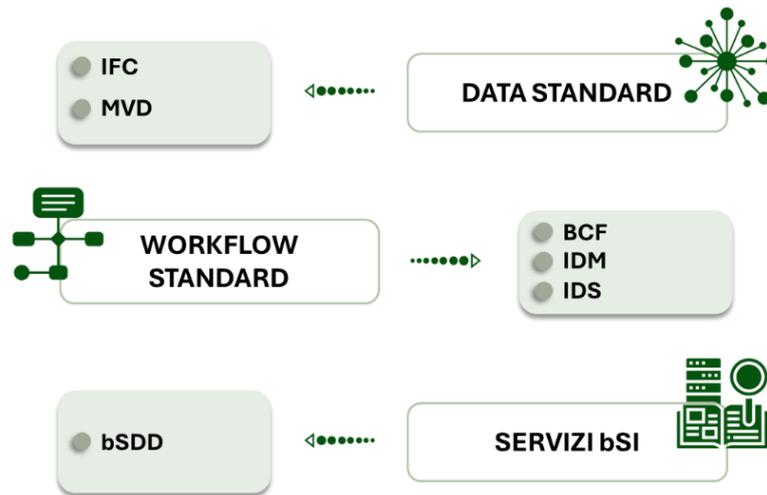


Figura 8 – Principali standard OpenBIM

Data standard

Questa categoria comprende gli standard che definiscono la struttura e l'organizzazione dei dati all'interno di un modello BIM. I principali sono:

- IFC (Industry Foundation Classes): formato che consente di strutturare e catalogare i dati all'interno di un modello informativo;
- MVD (Model View Definition): definisce quali dati siano necessari in specifici processi di comunicazione, agendo come un filtro per le proprietà IFC.

Workflow standard

Questa categoria include gli standard che regolano i processi di scambio informativo, al fine di coordinare in modo efficace le attività tra i diversi attori. Tra questi:

- BCF (BIM Collaboration Format): è un formato che consente la comunicazione dei problemi progettuali tra stakeholder tramite un sistema basato su screenshot, commenti e coordinate del modello. BCF è indipendente dal formato geometrico (es. IFC) e consente una revisione collaborativa senza duplicazione del modello;
- IDM (information delivery Manual): standardizza i flussi di scambio informativo tra i vari attori del processo edilizio;
- IDS (Information Delivery Specification): è uno standard più recente sviluppato da buildingSMART per specificare in modo leggibile dalla macchina (machine-readable) i requisiti informativi di un modello IFC. L'IDS consente il controllo automatico della qualità dei modelli, aumentando l'affidabilità e la coerenza dei dati scambiati. Può definire in modo preciso come devono essere consegnati oggetti, classificazioni, proprietà e persino valori numerici.

Servizi openBIM

Tra i servizi openBIM (bSI) è presente il BuildingSMART Data Dictionary (bSDD). Esso è un servizio web-based progettato per mappare e armonizzare la terminologia tecnica dell'ambiente costruito secondo uno standard condiviso. Il bSDD consente di associare a ogni elemento del modello una definizione univoca e standardizzata, facilitando l'uniformità semantica tra software diversi e utenti internazionali. È aggiornato da enti indipendenti e comprende dizionari nazionali, classificazioni normative e definizioni tecniche aziendali.

Lo standard IFC, normato dalla UNI EN ISO 16739-1, è alla base dell'OpenBIM. Tale sistema consente lo scambio dei modelli informativi senza perdita di dati, sebbene non permetta la modifica diretta dei file scambiati. L'IFC basato su linguaggi come EXPRESS e XML schema, garantisce trasparenza e tracciabilità dei dati, elementi essenziali per una progettazione e una gestione efficienti.

1.2.3 Formati aperti

I formati aperti rivestono un ruolo cruciale nei processi digitali del settore delle costruzioni, in quanto garantiscono l'accesso duraturo e trasparente ai dati, eliminando le incertezze legate ai diritti d'uso e riducendo il rischio di lock-in tecnologico. L'obiettivo primario consiste nel promuovere la libera fruibilità e la portabilità delle informazioni, incentivando la competizione tra software e prevenendo le situazioni di monopolio associate ai formati proprietari.

Un formato può essere definito aperto quando:

- Non presenta restrizioni legali, garantendo la libera fruizione dei dati;
- È conforme a standard internazionali, per una maggiore compatibilità tra piattaforme.

Nel contesto BIM, i formati aperti più diffusi includono IFC e gbXML, strumenti che rivestono un ruolo cruciale per garantire la condivisione efficace delle informazioni tra software eterogenei, assicurando un flusso di lavoro digitale efficiente e interoperabile [21].

IFC

L'Industry Foundation Classes, IFC, è il formato più diffuso per la condivisione e la gestione delle informazioni all'interno di un modello BIM. Sviluppato da BuildingSMART International, esso è uno standard di scambio dati aperto, neutro e indipendente dal software, il cui principale obiettivo è garantire l'interoperabilità nel settore delle costruzioni e dell'edilizia. Tale standard consente di rappresentare e scambiare informazioni riguardanti edifici e infrastrutture civili in modo strutturato e basato su oggetti, rendendolo uno strumento fondamentale nell'implementazione dell'OpenBIM. *“La specifica del modello dati IFC è aperta e disponibile, ed è stata riconosciuta e registrata dalla ISO come norma internazionale ISO 16739:2013”* [38].

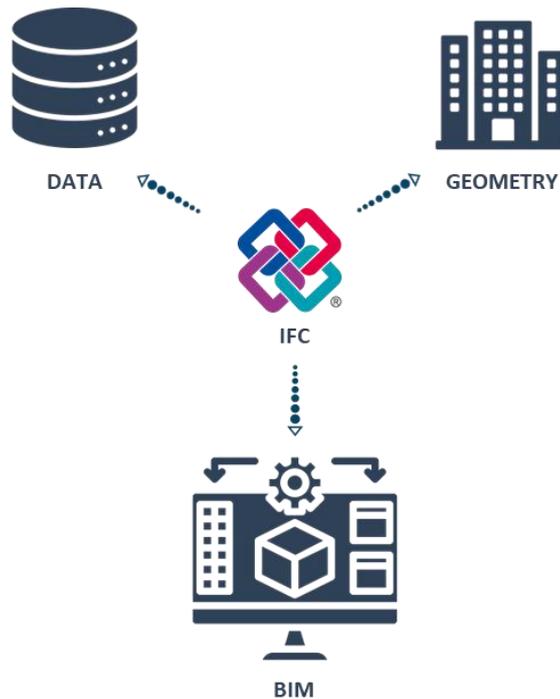


Figura 9 – Esempio flusso OpenBIM

Il formato in questione è definito come un modello di dati che consente di descrivere non solo la geometria e le proprietà fisiche degli elementi edilizi (muri, solai, porte, finestre, ecc.), ma anche informazioni aggiuntive come quantità, costi, fasi temporali e relazioni tra gli elementi. Inoltre, l'IFC adotta un approccio object-based, premettendo una gestione strutturata delle informazioni.

Tale formato si distingue per essere:

- Aperto: la specifica di codifica dell'informazione è pubblica e accessibile a tutti, senza restrizioni legali o tecniche;
- Neutrale: il suo sviluppo non è controllato da alcuna azienda software, garantendo in questo modo alla sua indipendenza;
- Interoperabile: essendo un formato aperto è già supportato dai principali software BIM e consente la comunicazione tra diverse piattaforme.

Al fine di conformarsi a diverse configurazioni e livelli di dettaglio, l'IFC si articola in specifiche definite mediante il Model View Definition (MVD), che stabilisce le informazioni da includere per determinati usi del modello.

L'IFC non è solamente un formato di scambio, ma rappresenta altresì un modello di dati che può essere impiegato in diverse modalità:

- File di interscambio: permette di trasferire geometrie e informazioni mantenendo la struttura dell'insieme e delle parti;

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica

- Modello di dati: la sua flessibilità consente di selezionare e filtrare i dati in base alle esigenze del progetto;
- Elemento d'archivio: assicura tracciabilità, affidabilità e trasparenza delle informazioni nel tempo;
- Sistema di classificazione terminologica: organizza e identifica gli oggetti attraverso categorie specifiche, migliorando la ricerca e la gestione dei dati.

In base alle esigenze di produzione, scambio e utilizzo del modello, i dati IFC possono essere codificati in tre formati principali:

- IFC-SPF: definito dalla ISO 10303-21, *STEP-File*, è il formato predefinito con estensione ".ifc". Ogni riga rappresenta un singolo oggetto registrato, garantendo dimensioni compatte e una struttura leggibile dall'utente. È il formato IFC più utilizzato grazie alla sua efficienza e alla rappresentazione chiara del modello dati in EXPRESS;
- IFC-XML: definito dalla ISO 10303-28, *STEP-XML*, con estensione ".ifcXML", è progettato per l'interoperabilità tra strumenti basati su XML e lo scambio di modelli edilizi parziali. Tuttavia, a causa delle dimensioni maggiori (circa il 13% in più rispetto all'IFC-SPF), è meno diffuso nella pratica;
- IFC-ZIP: versione compressa degli altri formati, con estensione ".ifcZIP", consente di ridurre le dimensioni del file e può contenere anche materiali aggiuntivi.

EVOLUZIONE E VERSIONI

L'IFC ha subito un processo di evoluzione che ha comportato numerosi cicli di sviluppo, con più di una dozzina di iterazioni tra la versione IFC1 e l'attuale IFC4, incluse le versioni IFCXML e IFCZIP. Nel corso di tale processo, il nucleo centrale dello standard è rimasto immutato; si è piuttosto assistito all'aggiunta di classi e relazioni tra queste ultime, al fine di descrivere scenari sempre più dettagliati e di implementare lo standard sulla base dell'esperienza acquisita [39].

L'introduzione ufficiale di IFC4 nel 2013 ha segnato un significativo avanzamento nella gestione delle informazioni e nell'ampliamento delle funzionalità per il supporto di analisi strutturali e impiantistiche. Questo aggiornamento ha esteso il data set disponibile, rendendo possibile l'uso dei modelli in attività legate agli ambiti del 5D e 4D BIM, oltre che all'implementazione per analisi di performance energetica e ambientale. Tuttavia, la sua implementazione nei software ha richiesto diversi anni e, a partire dal 2018 BuildingSMART ha avviato un processo di certificazione per garantire la corretta adozione di IFC4, il quale è ancora in corso. In considerazione della suddetta problematica, l'IFC2X3, pubblicato nel 2006, risulta ancora la versione più diffusa nei software di settore.

IFC – Levels of Maturity

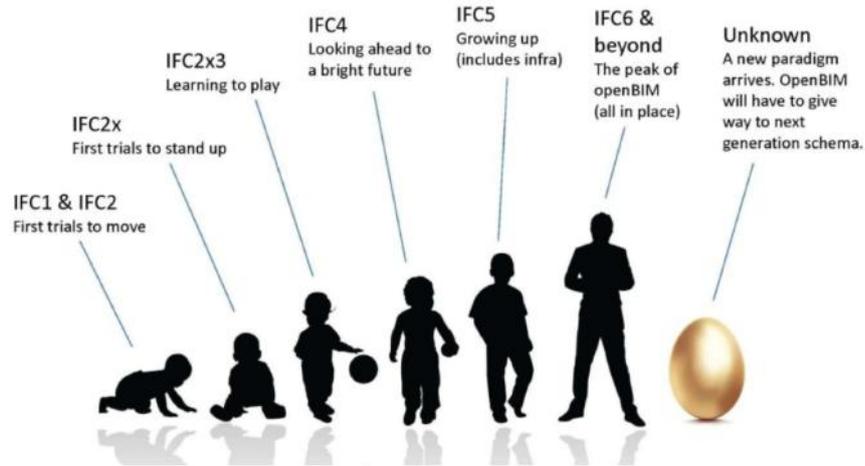


Figura 10 - Evoluzione IFC nel corso degli anni [40]

Inoltre, dopo anni di lavoro che ha coinvolto tra i più grandi progetti di BuildingSMART international (*ifcRail* e *IfcInfra*), nel 2022 è stata pubblicata l'ultima versione dell'IFC, la 4.3. Questa rappresenta un punto di svolta fondamentale in quanto consente di integrare in un unico formato sia il BIM verticale, legato al mondo edile, sia quello orizzontale, legato al settore delle infrastrutture, migliorando ulteriormente l'interoperabilità e la gestione delle informazioni.

STRUTTURA DATI E LINGUAGGIO

Il formato IFC è nato e si è sviluppato a partire dal linguaggio EXPRESS [41]., definito dalla norma ISO 10303-11, all'interno dello standard STEP (Standard for the Exchange of Product), che ne costituisce l'architettura di riferimento per la modellazione e lo scambio di dati tra sistemi eterogenei. IFC non è solamente un formato file, ma uno schema dati strutturato che rappresenta entità, attributi e relazioni all'interno di un modello BIM, abilitando l'interoperabilità tra piattaforme diverse.

Il linguaggio EXPRESS si basa su un paradigma object-oriented e può essere rappresentato in due modalità: una testuale, più dettagliata, in formato ASCII, e una grafica (EXPRESS-G), che visualizza entità e relazioni tramite simboli semantici, analogamente ai linguaggi di programmazione visuale. La rappresentazione grafica risulta più intuitiva per l'interpretazione generale dello schema, mentre quella testuale rimane la più completa per l'implementazione tecnica.

“Il più generico elemento definito attraverso EXPRESS viene chiamato con il termine SCHEMA”, e in ambito IFC uno schema rappresenta un insieme strutturato di entità, attributi e istanze relazionali” [42].

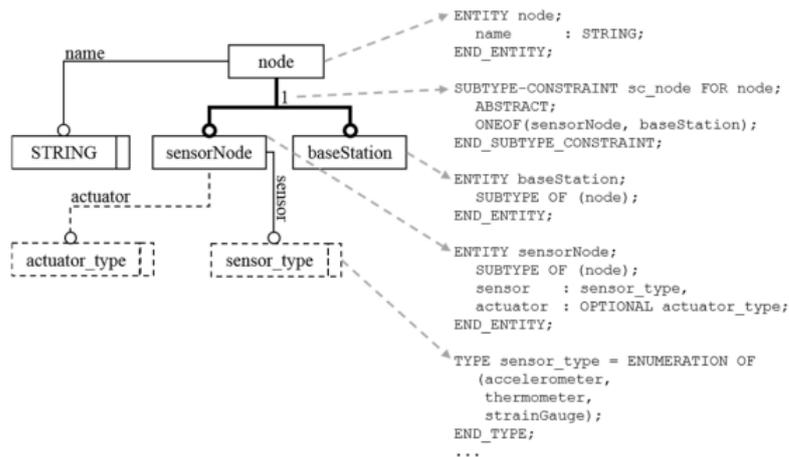


Figura 11 - Esempio del linguaggio EXPRESS-G e EXPRESS [43]

EXPRESS consente la definizione della struttura logica del modello, ma non fornisce indicazioni specifiche sulla rappresentazione delle istanze. Tale aspetto è invece gestito dallo standard STEP, che fornisce un formato di serializzazione testuale delle entità, basato su una sintassi formale che include intestazioni, dichiarazioni di entità e identificatori univoci (es. #n). Gli attributi delle istanze sono posizionali, ovvero seguono l'ordine dichiarato nello schema EXPRESS originario.

```

ISO-10303-21;
HEADER;
FILE_DESCRIPTION(('People and pets sample instance')
'1');
FILE_NAME('people-and-pets-1.p21',
'1999-10-15T15:30:00');
FILE_SCHEMA(('PEOPLE_AND_PETS'));
ENDSEC;
DATA;
#1=human(('W. Eliot Kimber'),#2,(#3,#4,#5))
#2=human(('Renee Swank'),#6,)
#3=cat(('Siegfried')..T.)
#4=cat(('Bete Noir', 'Beteski')..T.)
#5=dog(('Forrest', 'Dogboy', 'Noseboy')..F.)
#6=human(('Carla Corkern', 'Task Mistress'),#7,(#8, #9))
#7=human(('Lucie Feldstat'),#7.)
#8=dog(('Chauncy', 'The Chaunce Man')..F.)
#9=dog(('Chelsie', 'The Chelster')..F.)
ENDSEC;
END-ISO-10303-21;
    
```

Figura 12 - Rappresentazione standard STEP [44]

La collaborazione tra EXPRESS e STEP ha condotto alla generazione di un modello dati aperto e neutrale, capace di supportare la descrizione del ciclo di vita completo di un prodotto LCA senza restrizioni relative al software impiegato. Questo aspetto conferisce all'IFC il ruolo di formato pivotale per l'interoperabilità openBIM, in quanto consente lo scambio affidabile di modelli tridimensionali e informazioni tecniche tra discipline e strumenti differenti, garantendo coerenza semantica e portabilità dei dati all'interno dei processi digitali del settore delle costruzioni.

ARCHITETTURA SCHEMA IFC

In particolare, lo standard IFC segue le regole di EXPRESS e l'organizzazione del suo schema si basa su una ripartizione delle parti stabilita secondo una precisa gerarchia. La lingua di riferimento per nozioni e la nomenclatura dei dati è l'inglese e in base a quest'ultima vengono definiti *types* (tipi), *entities* (entità), *rules* (regole) e *function* (funzioni). Si evidenziano alcune convenzioni specifiche per la nomenclatura:

- Prefisso "Ifc": per gli elementi principali come i tipi, le entità, le regole e le funzioni, viene aggiunto il prefisso "Ifc". Successivamente, le parole vengono unite tramite la notazione CamelCase, dove ogni parola successiva al prefisso inizia con la lettera maiuscola. Esempio: *IfcWall*, *IfcBeam*, *IfcSlab*;
- Nomi degli attributi: gli attributi associati alle entità non hanno il prefisso "Ifc", ma sono anch'essi scritti in CamelCase. Esempio: *Length*, *Width*, *Height*;
- Property set (Pset): i set di proprietà hanno il prefisso "Pset_" e seguono anch'essi la convenzione CamelCase per la scrittura delle parole successive. Esempio: *Pset_DoorProperties*, *Pset_WallProperties*;
- Quantity (Qto): le quantità utilizzano il prefisso "Qto_" e seguono la stessa convenzione di CamelCase. Esempio: *Qto_Area*, *Qto_Volume*.

Il data schema dell'IFC è organizzato in quattro livelli concettuali, ciascuno dei quali raccoglie e definisce le entità (*entities*) impiegate nel modello IFC. Ogni livello concettuale è associato a uno schema di dati specifico, e le entità di un determinato livello possono essere correlate solo con altre entità che appartengono a livelli uguali o inferiori. Questo approccio gerarchico consente di organizzare e gestire le informazioni in modo strutturato, garantendo la coerenza e l'integrità del modello in relazione alla complessità delle varie entità e al loro interconnettersi.

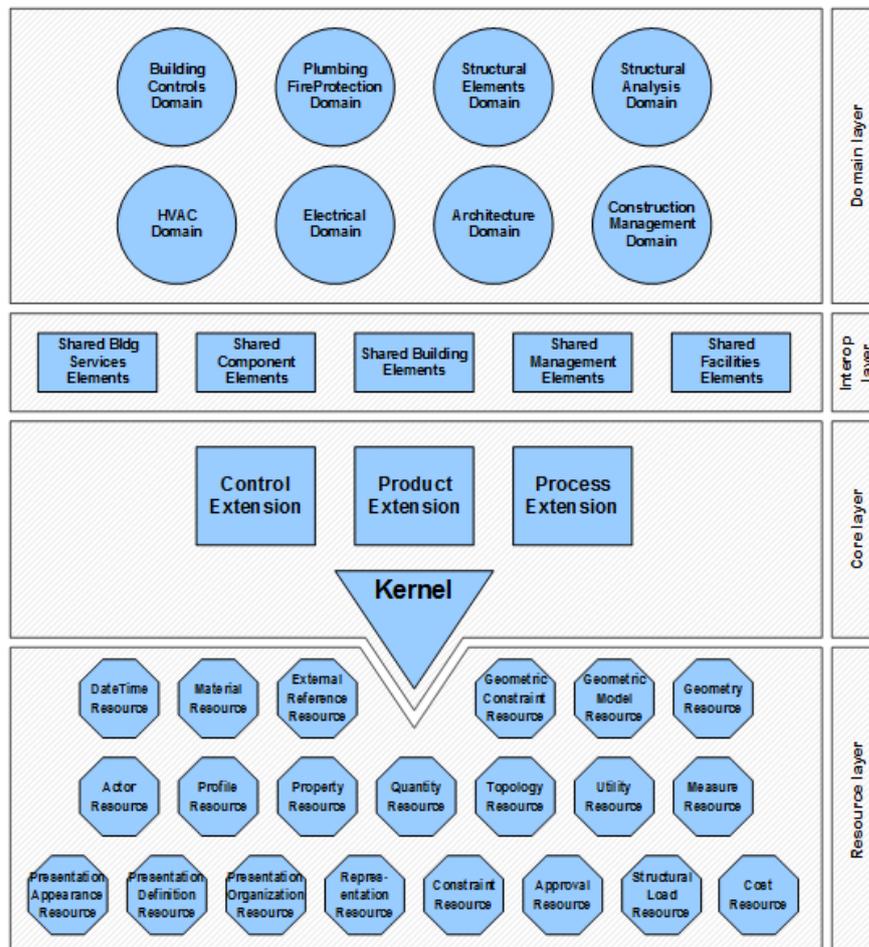


Figura 13 - Schema Kernel IFC4 Add2 [45]

- *Resource layer*: questo è il livello più basso e rappresenta la parte più astratta dello schema Core. Le entità in questo livello sono non radicate, ossia esistono solo se c'è un collegamento diretto o indiretto con entità provenienti da livelli superiori. Il Resource Layer si occupa principalmente delle proprietà di base degli oggetti, come:
 - Geometria: Forma e dimensioni degli oggetti;
 - Materiali: Tipologia e caratteristiche dei materiali;
 - Costi: Prezzi e valori economici associati agli oggetti.
- *Core layer*: questo livello definisce la struttura di base di un file IFC ed include entità astratte che sono referenziate e specializzate dai livelli superiori. Il Core Layer è suddiviso principalmente in:
 - *Control Extension*: include le entità relative al controllo e all'assegnazione degli oggetti;
 - *Product Extension*: contiene le entità che descrivono i prodotti (sia singoli che intere categorie di prodotti);
 - *Process Extension*: comprende le entità che si occupano dei processi, della pianificazione e del controllo dei lavori;

- *Kernel*: la parte più astratta del *Core Schema*, che include entità che descrivono aspetti generali degli oggetti, come proprietà, relazioni tra entità e sequenze di processi. Le entità presenti nel Kernel fungono da collegamento con quelle del *Resource Layer*.
- *Interoperability/shared layer*: questo livello definisce le entità che descrivono processi o risorse specifiche utilizzate in diverse discipline. Le entità di questo livello possono fare riferimento alle entità presenti nel *Domain Layer*;
- *Domain layer*: è il livello più alto e contiene le specializzazioni finali delle entità che non possono essere referenziate da altri livelli. Questo livello è specifico per la condivisione di informazioni all'interno di singole discipline professionali. Le entità sono organizzate in base ai domini disciplinari, che comprendono:
 - *IfcArchitectureDomain*;
 - *IfcBuildingControlsDomain*;
 - *IfcConstructionMgmtDomain*;
 - *IfcElectricalDomain*;
 - *IfcHvacDomain*;
 - *IfcPlumbingFireProtectionDomain*;
 - *IfcStructuralAnalysisDomain*;
 - *IfcStructuralElementsDomain*.

In un file IFC, le entità possono essere divise in due principali tipologie:

- Entità radicate: queste entità fanno riferimento a *IfcRoot* e possiedono una propria identità. Contengono attributi come nome e descrizione, inoltre sono entità fondamentali che possono esistere autonomamente;
- Entità non radicate: queste entità non possiedono una propria identità e dipendono dal collegamento a una entità radicata per esistere; quindi, esse esistono solo in relazione ad altre entità.

L'*IfcRoot* rappresenta la classe primaria alla quale tutte le entità definite nel Kernel o nel Resource schema devono fare riferimento. Ogni entità radicata deve avere una connessione diretta o indiretta con *IfcRoot*, al fine di garantire la coerenza e l'integrità all'interno dello schema. "*IfcRoot* è la classe più astratta e primaria per tutte le definizioni di entità che hanno origine nel kernel o nei livelli successivi della specifica IFC. È quindi il *Supertype* comune di tutte le entità IFC, oltre a quelle definite in uno schema di risorse IFC. Tutte le entità che sono sottotipi di *IfcRoot* possono essere utilizzate in modo indipendente, mentre le entità dello schema di risorse, che non sono sottotipi di *IfcRoot*, non sono considerate entità indipendenti" [45].

Inoltre, l'impiego dell'IFC presenta ulteriori vantaggi, tra cui:

- Migliore qualità delle informazioni scambiate tra le diverse discipline coinvolte nel progetto;
- Riduzione degli errori dovuti a incompatibilità tra software, migliorando la coerenza dei dati;
- Ottimizzazione dei costi grazie alla standardizzazione dei processi e alla riduzione della necessità di rielaborazione;
- Risparmio di tempo, evitando ripetute importazioni e riallineamenti manuali dei dati.

Proprio per queste sue peculiarità, il Building Information Modeling trova applicazione in tutte le fasi del ciclo di vita di un edificio: dall'analisi di fattibilità alla progettazione, costruzione, gestione e manutenzione.

1.2.4 BEM

Il Building Energy Modeling (BEM) rappresenta un'estensione naturale dell'approccio digitale introdotto dal BIM, applicato all'analisi delle prestazioni energetiche dell'edificio. Negli ultimi anni, il si è affermato come uno strumento indispensabile per progettisti, ingegneri e consulenti energetici impegnati nello sviluppo di edifici ad alte prestazioni. Il BEM si fonda sull'impiego di modelli digitali computazionali che consentono di simulare dinamicamente il comportamento energetico dell'edificio, superando i tradizionali calcoli statici per offrire una visione integrata e dettagliata dei consumi, delle prestazioni termiche e dell'efficienza degli impianti.

Il BEM rappresenta una metodologia che permette di prevedere e analizzare il fabbisogno energetico di un edificio nel suo ciclo di vita, valutando aspetti come:

- il consumo per riscaldamento e raffrescamento;
- la ventilazione e la qualità dell'aria;
- l'illuminazione naturale e artificiale;
- l'integrazione di fonti rinnovabili;
- le emissioni e l'impatto ambientale.

Il modello BEM utilizza dati parametrici relativi alla geometria dell'edificio, ai materiali, alle stratigrafie, ai sistemi impiantistici e alle condizioni climatiche di progetto per simulare il funzionamento energetico in scenari reali e ipotetici. Questo lo rende uno strumento prezioso in fase di:

- progettazione preliminare, per ottimizzare forma, orientamento, materiali;
- certificazione energetica, per il rispetto degli standard e delle normative;
- riqualificazione, per identificare gli interventi di retrofit più efficaci;

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica

- verifica di scenari, ad esempio per l'integrazione di tecnologie basate su fonti rinnovabili. [46]

La realizzazione di un modello BEM si articola in più fasi, che seguono un flusso logico:

1. Raccolta e analisi dei dati: vengono raccolti i dati geometrici, fisici e tecnici dell'edificio (geometria, involucro, impianti, destinazioni d'uso).
2. Creazione del modello BIM: si realizza un modello digitale che rappresenta fedelmente le caratteristiche architettoniche, strutturali e impiantistiche dell'edificio.
3. Generazione dell'Energy Analysis Model (EAM): si semplifica la geometria e si estraggono le informazioni pertinenti per le simulazioni energetiche. Questo modello intermedio rappresenta un ponte tra BIM e BEM.
4. Simulazione BEM: il modello EAM viene importato in software specialistici per eseguire simulazioni dinamiche e analizzare il comportamento energetico in relazione a clima, uso e dotazioni tecnologiche.
5. Output e ottimizzazione: i risultati vengono utilizzati per verificare il rispetto delle normative, ottimizzare la progettazione e supportare le decisioni sul piano tecnico ed economico.

CARATTERISTICHE DEL MODELLO BEM

Il BEM si distingue per la sua capacità di:

- rappresentare in modo integrato le interazioni tra involucro e impianti;
- gestire scenari dinamici su base oraria o sub-oraria;
- considerare variabili reali come condizioni climatiche, carichi interni, occupazione e gestione degli impianti;
- generare diagnosi energetiche accurate e supportare strategie di decarbonizzazione.

Grazie alla possibilità di effettuare simulazioni in fase di progetto, il BEM contribuisce a ridurre i rischi legati a sovradimensionamenti, scelte impiantistiche inadeguate o carenze prestazionali, consentendo una progettazione orientata alla sostenibilità e alla resilienza.

I software di BEM più diffusi, come EnergyPlus, DesignBuilder, IESVE e, in Italia, Edilclima EC700, si interfacciano con i modelli BIM tramite formati di interscambio come IFC e gbXML, che consentono di trasferire in modo strutturato le informazioni necessarie alla simulazione. L'efficacia del processo dipende dalla qualità e dalla completezza dei dati esportati, nonché dalla capacità di ridurre al minimo gli interventi manuali di rielaborazione.

Il BEM si colloca al centro delle strategie per il raggiungimento degli obiettivi europei di decarbonizzazione e per la realizzazione di edifici a energia quasi zero (nZEB). La possibilità di integrare la simulazione energetica con strumenti avanzati come sistemi di BMS, Internet of Things (IoT) e Digital Twin apre nuove frontiere per il monitoraggio in tempo reale e l'ottimizzazione continua delle prestazioni energetiche durante l'intero ciclo di vita dell'edificio.

Il Building Energy Modeling, quindi, non è solo un supporto alla progettazione, ma un elemento chiave per la gestione consapevole e sostenibile del patrimonio edilizio, in linea con le più recenti direttive europee e le buone pratiche internazionali.

1.2.5 Interoperabilità tra BIM e BEM

L'integrazione tra BIM e BEM emerge come una delle sfide più significative nel processo di digitalizzazione del settore edilizio. D'altra parte, sebbene il BIM fornisca un potente strumento per la rappresentazione tridimensionale e la gestione integrata dei dati relativi all'edificio durante il suo ciclo di vita, la sua applicazione alla simulazione energetica è ancora ostacolata da limiti legati alla qualità e completezza dei dati e alla mancanza di interoperabilità.

Un modello BIM, sebbene possa risultare estremamente dettagliato in termini di geometria e componenti, non sempre contiene tutte le informazioni necessarie per una descrizione accurata del comportamento energetico dell'edificio. La qualità del modello energetico dipende in misura significativa dalla calibrazione e dalla completezza delle fonti dati integrate nel BIM. Anche un modello accurato dal punto di vista architettonico può risultare insufficiente per simulare i consumi energetici reali se privo di dati adeguati sui materiali, sulle stratigrafie o sui sistemi impiantistici.

CRITICITÀ DEL FLUSSO BIM TO BEM

Nella pratica corrente, la transizione dal Building Information Modeling al Building Energy Model avviene spesso attraverso processi manuali non standardizzati. I dati raccolti da diverse fonti vengono rielaborati per creare un file di input compatibile con i software di simulazione energetica. Tale trasformazione è fortemente condizionata dalle competenze del modellatore e dai metodi individuali sviluppati nel tempo, generando modelli energetici diversi anche a partire dalla stessa base progettuale.

Come evidenziato in ambito accademico:

“La tradizionale separazione tra architettura, simulazione energetica e meccanica, nonché tra le discipline professionali ingegneristiche e la loro partecipazione all'attuale processo di progettazione; ne risulta una dicotomia tra una veduta architettonica di un edificio e una simulazione energetica per la

natura autonoma degli strumenti software utilizzati da ciascuna delle discipline progettuali partecipanti" [47].

Inoltre, i modelli impiegati per la simulazione (BEPS) richiedono una geometria più semplice rispetto a quella del modello BIM/CAD, imponendo un ulteriore lavoro di semplificazione e rielaborazione [48].

VERSO UN FLUSSO INTEGRATO: OPPORTUNITÀ E STRUMENTI

Superare queste criticità è possibile grazie a un flusso dati automatizzato e interoperabile. L'export del modello BIM in formati aperti come IFC, arricchito con proprietà adeguate, rappresenta un primo passo. Tuttavia, per generare un modello BEPS completo e pronto alla simulazione, è necessario un processo articolato:

- Controllo e risoluzione delle incongruenze del modello BIM;
- Arricchimento dei dati mancanti rilevanti per la simulazione;
- Generazione e validazione del modello BEM.

L'integrazione tra BIM e BEM apre nuove prospettive per la gestione e la progettazione degli edifici: mappe digitali del flusso di calore ottenute da immagini termiche, sensori IoT e registri di manutenzione possono alimentare modelli energetici avanzati e supportare strategie per edifici a basse emissioni e ad alte prestazioni.

Nonostante queste potenzialità, l'interoperabilità tra BIM e BEM resta un punto debole. Le principali problematiche sono:

- perdita di dati durante il trasferimento;
 - necessità di reinserimento manuale delle informazioni nel modello BEM;
 - processi non standardizzati che compromettono la qualità e la coerenza dei dati " [49].
- [50].

ESEMPIO: PROGETTO BIMM4EEB

Il progetto BIM4EEB, finanziato nell'ambito di Horizon 2020, si prefigge di sviluppare strumenti digitali interoperabili per la riqualificazione efficiente degli edifici, con un'attenzione particolare rivolta alle esigenze delle Energy Service Companies (ESCO), dei facility manager e delle pubbliche amministrazioni coinvolte nei processi di ristrutturazione. Tra i principali output vi è lo sviluppo di un Building Information Modeling Management System, che funge da contenitore dei dati di un DBL, interoperabile con fonti eterogenee, inclusi file IFC e dati Energy Performance Certificate [51].

L'obiettivo principale è quello di facilitare l'accesso e l'utilizzo delle informazioni rilevanti durante tutto il ciclo di vita dell'edificio da parte degli stakeholder coinvolti, garantendo l'interoperabilità tra il modello BIM e i dati energetici, un aspetto fondamentale per il processo BIM to BEM. Il Digital Logbook, sviluppato nell'ambito del progetto, non è un semplice file, ma un sistema dinamico e accessibile da piattaforma web, con aggiornamenti costanti da parte degli attori coinvolti.

Il documento sottolinea inoltre come uno dei principali ostacoli ai processi di ristrutturazione sia la frammentazione delle informazioni e la scarsa interoperabilità tra dati energetici e modelli digitali. Tale elemento ostacola il calcolo energetico affidabile e la valutazione delle opzioni di retrofit. In tale contesto, l'integrazione di dati IFC con informazioni provenienti da EPC, audit energetici, sensori IoT e sistemi BACS risulta fondamentale per alimentare correttamente le simulazioni BEM.

In particolare, si definiscono strutture informative dettagliate per ogni componente del Digital Logbook, includendo dati su:

- Identità amministrativa e anagrafica dell'edificio,
- Caratteristiche costruttive (componenti opache, infissi, impianti HVAC, RES, ecc.),
- Performance energetiche derivate da EPC,
- Dati di uso e manutenzione,
- Dati da sensori e IoT.

La mappatura bidirezionale tra IFC e attributi energetici rappresenta un passaggio chiave per abilitare l'interoperabilità e alimentare correttamente le simulazioni BEM mediante formati standard (ad esempio XML) e plugin specialistici.

2. METODOLOGIA

Il presente lavoro si inserisce nel quadro delle attuali sfide legate alla digitalizzazione e alla decarbonizzazione del patrimonio edilizio, con l'obiettivo di proporre un flusso operativo innovativo in ottica openBIM. La metodologia sviluppata mira a integrare in modo automatico i dati contenuti nei file IFC con quelli presenti nei file XML derivanti dagli Attestati di Prestazione Energetica. L'obiettivo primario dell'approccio proposto è l'implementazione di un modello informativo dell'edificio che includa dati energetici certificati, al fine di stabilire un collegamento strutturato tra il modello geometrico e le informazioni prestazionali. Tale integrazione è finalizzata al miglioramento dell'efficacia e dell'automazione dei processi di simulazione, certificazione e monitoraggio energetico lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio.

2.1 Strategia metodica

La metodologia si fonda sull'integrazione tra i dati energetici certificati e i modelli digitali, con l'obiettivo di incrementare il livello di interoperabilità e automazione nella gestione delle informazioni energetiche in ambiente BIM. In particolare, è stato deciso di impiegare lo standard IFC, riconosciuto a livello internazionale come strumento openBIM principale per garantire lo scambio strutturato e neutrale dei dati tra i diversi attori del processo edilizio.

L'approccio metodologico adottato consente l'integrazione sistematica dei dati presenti negli APE all'interno dei modelli IFC, mediante la costruzione di una mappatura a uno a uno tra gli attributi energetici e le entità del modello. Questo risultato è reso possibile dalla disponibilità dei dati energetici in un formato leggibile da macchina, come l'XML, che rappresenta il presupposto essenziale per l'automazione del processo di integrazione. La presenza di uno schema XML definito consente, infatti, di interpretare correttamente la struttura del dataset e di mappare con precisione i dati verso le corrispondenti entità IFC, garantendo coerenza semantica, accuratezza nell'integrazione e scalabilità del metodo.

La metodologia applicata si sostanzia in un processo sistematico, volto all'inserimento delle informazioni energetiche certificate nel modello digitale dell'edificio. Il processo in esame si prefigge di fornire supporto allo sviluppo di un prototipo di DBL, uno strumento ideato per facilitare il monitoraggio delle prestazioni energetiche, la pianificazione degli interventi di riqualificazione e la gestione delle attività di manutenzione. Tale processo si svolge in conformità con i principi dell'openBIM, con l'obiettivo di garantire la trasparenza, la tracciabilità e il riuso dei dati durante l'intero ciclo di vita dell'edificio.

Un aspetto centrale della metodologia riguarda la validazione del processo sviluppato, realizzata attraverso l'impiego di un visualizzatore interattivo progettato nell'ambito delle attività di ricerca del progetto GEEDI. Questo strumento è stato concepito per consentire la lettura, l'analisi e la fusione dei dati provenienti dai file IFC e dai file XML degli APE. Il visualizzatore consente la generazione di modelli digitali arricchiti, nei quali le informazioni geometriche e funzionali (derivate, ad esempio, dalla modellazione parametrica con software come Revit) risultano integrate con i dati energetici certificati.

Il sistema fornisce un supporto tangibile alle attività di verifica, controllo e interoperabilità con software terzi, costituendo un primo passo verso l'implementazione di strumenti avanzati quali il Digital Building Logbook e il Building Renovation Passport, in linea con le recenti direttive europee in materia di efficienza energetica e digitalizzazione del settore delle costruzioni.

La figura sottostante illustra in modo schematico le fasi principali della metodologia proposta e il relativo flusso operativo.

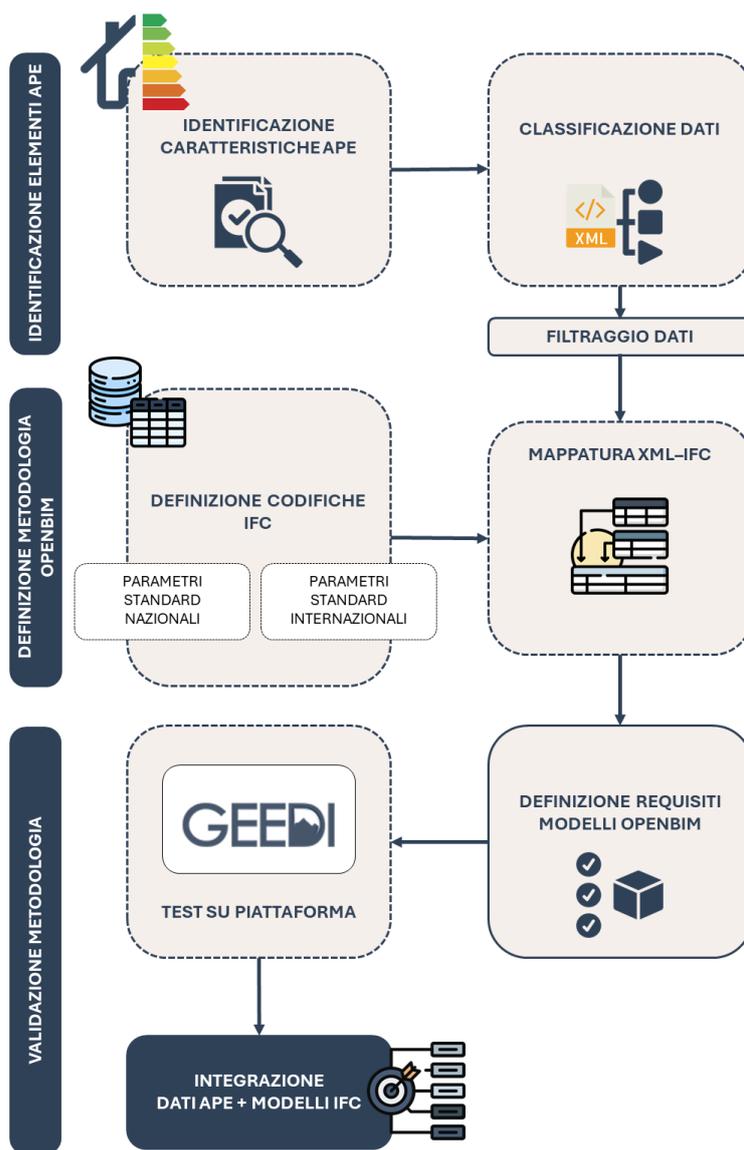


Figura 14 - Schema metodologico

2.2 GEEDI

Come emerso nei capitoli precedenti, l'adozione del BIM e dello standard aperto IFC ha rivoluzionato il settore delle costruzioni, promuovendo nuovi metodi digitali per la gestione dell'intero ciclo di vita degli edifici. In particolare, l'integrazione dei modelli BIM con strumenti per la simulazione energetica si sta affermando come pratica essenziale per ottimizzare le prestazioni degli edifici e supportare decisioni consapevoli nel processo progettuale.

Nonostante i progressi, permangono criticità legate all'interoperabilità tra software BIM e strumenti di simulazione (BEM). Le difficoltà principali riguardano l'esportazione dei dati energetici, la standardizzazione delle informazioni e l'automazione dei flussi informativi lungo il ciclo edilizio. Questa discontinuità compromette l'efficienza dei passaggi tra progettazione, costruzione e gestione.

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica

A livello europeo, la Direttiva EPBD 2023 sottolinea l'importanza degli strumenti digitali, introducendo il DBL e il BRP come strumenti fondamentali per la pianificazione e la gestione della riqualificazione energetica. Il DBL, in particolare, si configura come un archivio digitale dinamico e condiviso che consente di registrare, organizzare e arricchire i dati dell'edificio, a supporto di una gestione trasparente e informata.

Tuttavia, l'implementazione nei software BIM è ancora parziale, causando frammentazione e perdita di dati durante gli scambi IFC-BEM.

GEEDI: UNA PIATTAFORMA PER L'INTEGRAZIONE BIM-ENERGETICA

In questo contesto si colloca GEEDI, una piattaforma sviluppata nell'ambito della digitalizzazione dei processi energetici e della gestione del patrimonio edilizio. Il visualizzatore GEEDI rappresenta uno strumento innovativo per la visualizzazione e gestione integrata di file IFC e XML, progettato per migliorare l'interoperabilità e facilitare la fruizione dei dati energetici nei modelli BIM.

La piattaforma è concepita per:

- supportare la lettura dei principali formati standard (IFC per la geometria e la struttura informativa dell'edificio, XML per i dati tecnici ed energetici dell'APE);
- offrire un'interfaccia intuitiva e interattiva, accessibile anche a utenti non esperti;
- consentire la navigazione nel modello 3D e l'esplorazione delle proprietà associate agli oggetti BIM (es. *IfcWall*, *IfcSpace*, *IfcWindow*).

L'elemento distintivo della piattaforma GEEDI è la funzione di fusione automatizzata tra file IFC e file XML APE. Attraverso una mappatura 1:1 predefinita tra le entità IFC e i parametri energetici dell'APE (es. trasmittanze, rendimenti, fonti rinnovabili), il sistema genera un modello IFC arricchito con dati prestazionali. Questi dati vengono inseriti in Property Sets personalizzati, senza sovrascrivere le informazioni originarie, garantendo così la distinzione tra dati nativi del modello e informazioni energetiche certificate.

Il risultato è un modello federato multidisciplinare, che consente:

- la tracciabilità e la consultazione integrata delle informazioni;
- il supporto ai requisiti del Digital Building Logbook e delle direttive europee in materia di efficienza energetica;
- una gestione più consapevole e avanzata delle strategie di retrofit.

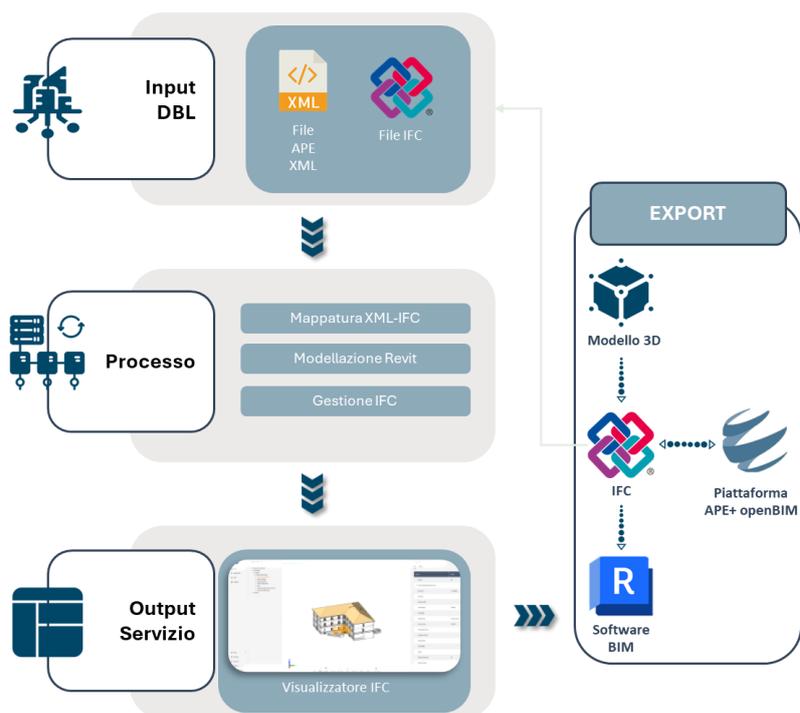


Figura 15 – GEEDI: Flusso piattaforma openBIM

La soluzione proposta si basa su tecnologie open source e standard aperti (es. *IfcOpenShell*), promuovendo l'indipendenza da software proprietari e la coerenza con i principi dell'openBIM. Questo approccio mira a superare le attuali criticità legate alla frammentazione dei dati e a favorire un ecosistema digitale integrato, in linea con le nuove esigenze del settore.

2.3 Caso studio

Al fine di valutare la metodologia proposta, è stato selezionato come caso studio un complesso edilizio esistente situato nel centro storico di Pinerolo (TO), noto come "Caserma Litta Modignani". Il progetto di rifunzionalizzazione di tale complesso prevede la trasformazione dell'edificio nella nuova sede dell'Agenzia delle Entrate e di un Polo Archivistico.



Figura 16 – Inquadramento caso studio

STATO DI FATTO

Per quanto concerne lo stato di fatto, a livello funzionale, il complesso architettonico è costituito da nove corpi edilizi (identificati con le lettere dalla A alla H), derivanti da un impianto originario composto da quattro edifici principali, successivamente ampliato e collegato da corpi minori nel corso del tempo (fino agli anni '80).

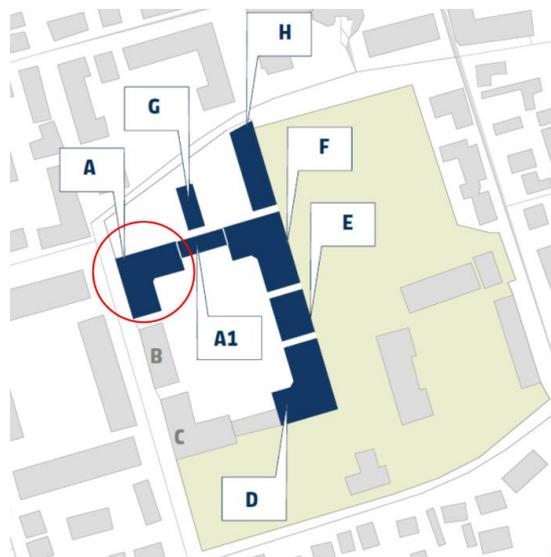


Figura 17 - Suddivisione del complesso architettonico

L'analisi si concentra sull'edificio A, caratterizzato da una planimetria a "L" e sviluppato su tre livelli fuori terra. L'ingresso principale è situato in prossimità dell'angolo del cortile interno, mentre il vano scala principale è collocato nell'atrio. Dal punto di vista funzionale, la distribuzione originaria dell'edificio A comprendeva:

- Il piano terra: in origine era adibito a funzioni amministrative, con uffici, magazzini e uno spaccio nonché a servizi di pubblico interesse, come un barbiere. Il refettorio interno, caratterizzato da setti murari centrali, era uno spazio destinato alla socializzazione e al ristoro;
- I piani superiori: destinati a dormitori;
- Il sottotetto: praticabile e accessibile tramite botola.

La struttura portante è in muratura in mattoni pieni, con solai in laterocemento e copertura a falde inclinate con struttura lignea e manto in tegole tipo coppo.

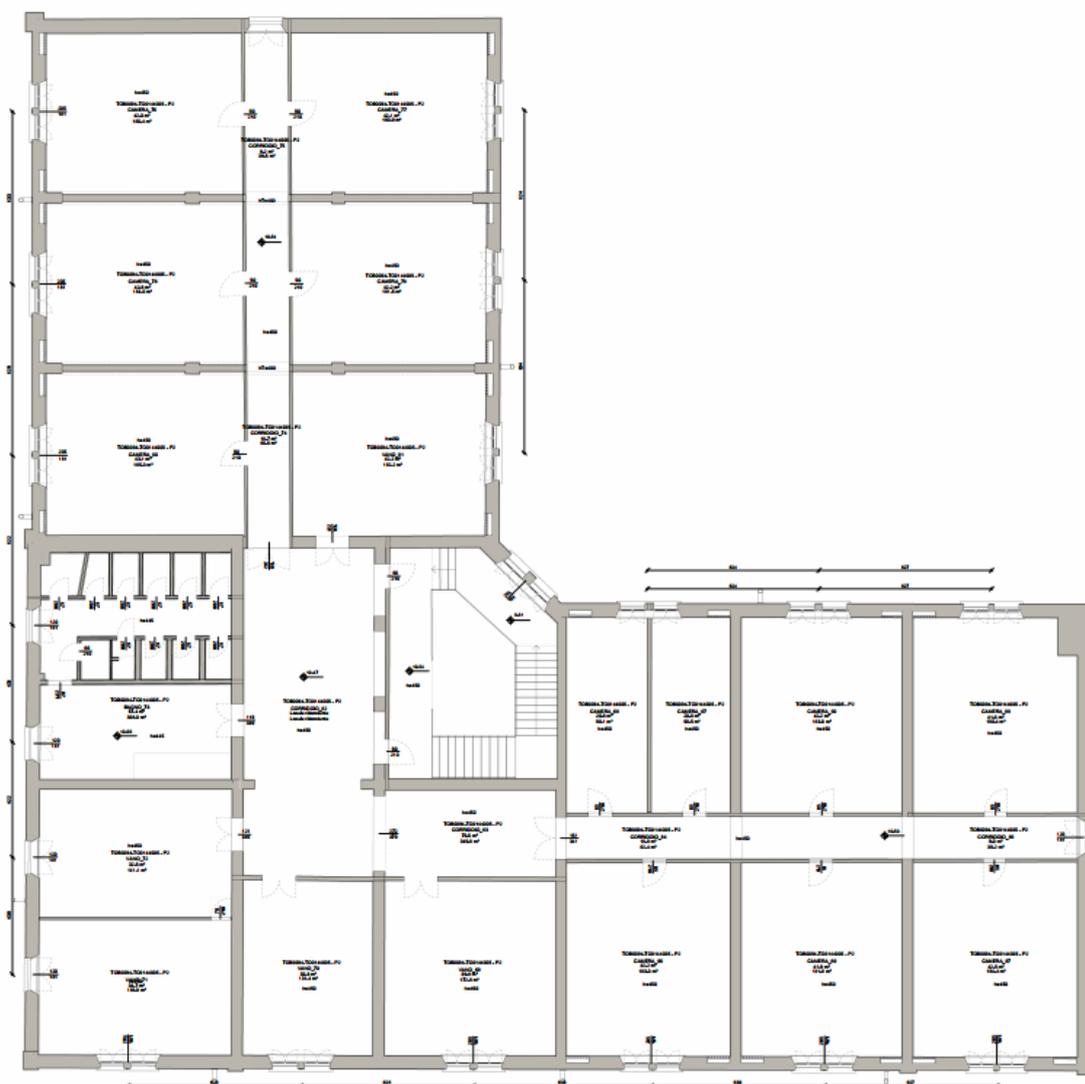


Figura 18 - Planimetria secondo piano stato di fatto

STATO DI PROGETTO

Nell'ambito della rifunionalizzazione dell'edificio, si è previsto un importante intervento di riqualificazione degli impianti tecnici, con particolare riferimento ai sistemi HVAC (*Heating, Ventilation*

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica *and Air Conditioning*) e alla produzione e distribuzione di acqua calda sanitaria (ACS). Tali sistemi sono stati progettati per garantire condizioni ottimali di comfort termo-igrometrico, nonché un adeguato ricambio d'aria in funzione della destinazione d'uso dei diversi ambienti.

Le principali macro-aree funzionali individuate nell'edificio A includono:

- Uffici operativi;
- Sale riunioni;
- Archivi;
- Servizi igienici;
- Spazi di distribuzione e connettivi;
- Locali tecnici.

Il sistema di climatizzazione si basa su due pompe di calore aria-acqua, collocate sulla copertura dell'edificio H. le caratteristiche principali dei generatori sono:

- Pompa di calore reversibile (gas refrigerante R290): potenza frigorifera 240 kW, potenza termica 150 kW;
- Pompa di calore R290: potenza frigorifera 240 kW, potenza termica 284kW.

All'interno dell'edificio A, al piano terra è collocata la centrale termica, che ospita:

- Bollitori con pompe di calore dedicate, destinati alla produzione di acqua calda sanitaria (ACS);
- Accumulatore tecnico, collocato nella centrale termica, per ottimizzare la gestione energetica del sistema;
- Diramazione del circuito di distribuzione verso i terminali;
- Collegamento all'unità di trattamento aria, che concorre al controllo termo-igrometrico.

MODELLO MECCANICO

L'impianto meccanico della Caserma Litta Modignani è suddiviso in due principali sottoinsiemi:

- Impianto di climatizzazione;
- Impianto di ventilazione.

Entrambi i sistemi sono costituiti da diverse componenti, ciascuna delle quali assolve a una funzione specifica all'interno del sistema complessivo.

IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE

L'impianto di climatizzazione è dotato di due generatori di calore, costituiti da pompe di calore aria-acqua, posizionati sulla copertura dell'Edificio H, impiegati per il condizionamento e il riscaldamento

degli ambienti della Palazzina A, dove è ubicata la centrale termica. All'interno della centrale termica sono ubicati gli elementi di distribuzione del fluido termovettore verso le diverse zone dell'edificio. Inoltre, il sistema è integrato con un'unità di trattamento aria (UTA) il cui funzionamento è legato principalmente al sistema di ventilazione, ma contribuisce indirettamente anche alla regolazione termo-igrometrica degli ambienti.

Di seguito si riporta uno schema rappresentativo dell'impianto di climatizzazione progettato, con riferimento al primo piano dell'edificio:

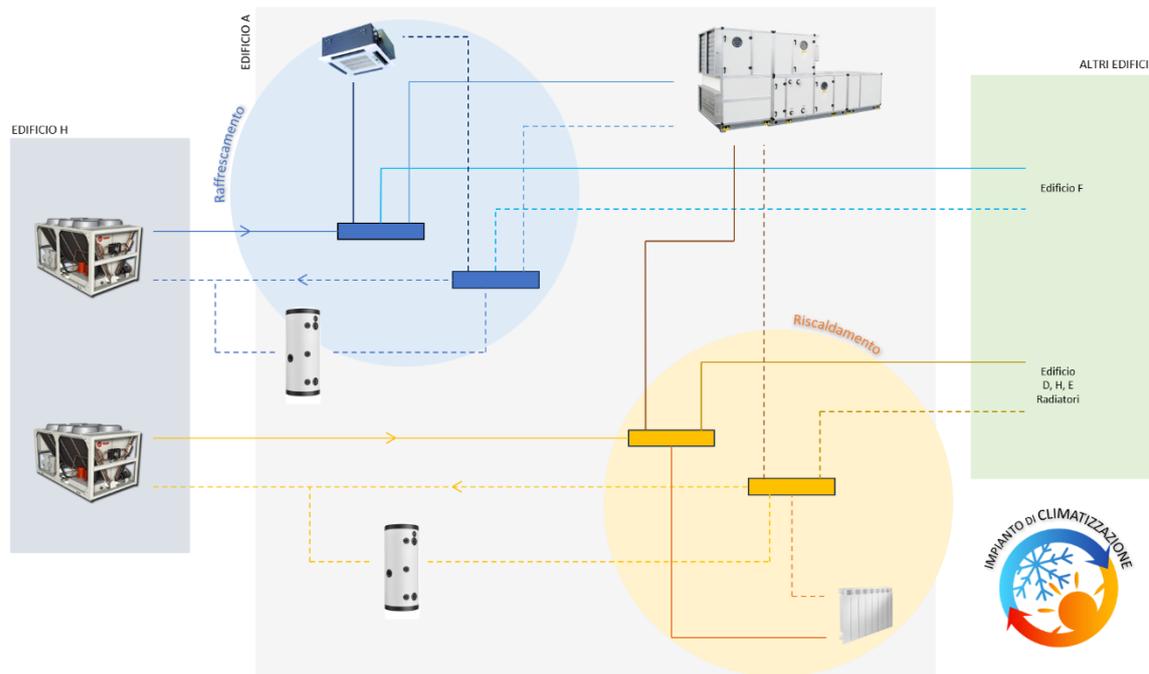


Figura 19 - Schema impianto di climatizzazione

IMPIANTO DI VENTILAZIONE

Il sistema di ventilazione è affidato all'UTA, il cui schema di funzionamento prevede le seguenti fasi:

- Presa d'aria esterna, mediante apertura o condotta dedicato per introdurre aria nuova fresca all'interno del sistema;
- Trattamento dell'aria, che prevede la filtrazione, la deumidificazione e il controllo della temperatura;
- Immissione dell'aria trattata negli ambienti interni, garantendo il corretto ricambio d'aria;
- Ripresa dell'aria esausta dagli ambienti interni, tramite apposite griglie o condotti di aspirazione;
- Espulsione dell'aria all'esterno, dopo un ulteriore trattamento per minimizzare l'impatto ambientale.

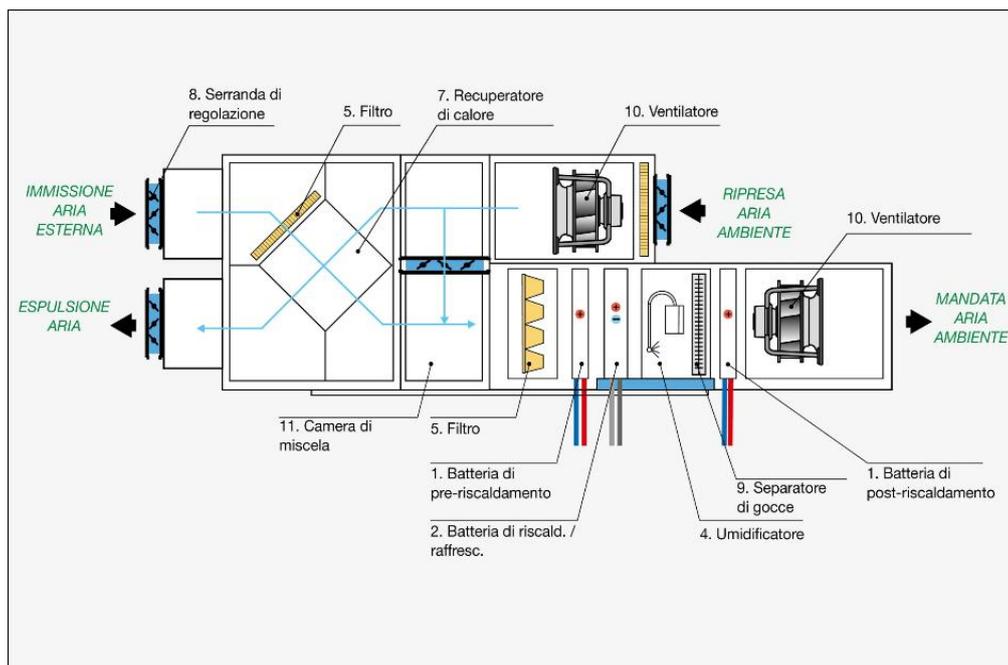


Figura 20 - Schema funzionamento UTA [fonte: Caleffi]

L'impianto in questione è progettato per garantire condizioni di comfort ottimali negli ambienti occupati, mantenendo un adeguato tasso di ventilazione e un controllo della qualità dell'aria interna. Di seguito si riporta un estratto della progettazione dell'impianto di ventilazione, con riferimento al primo piano:

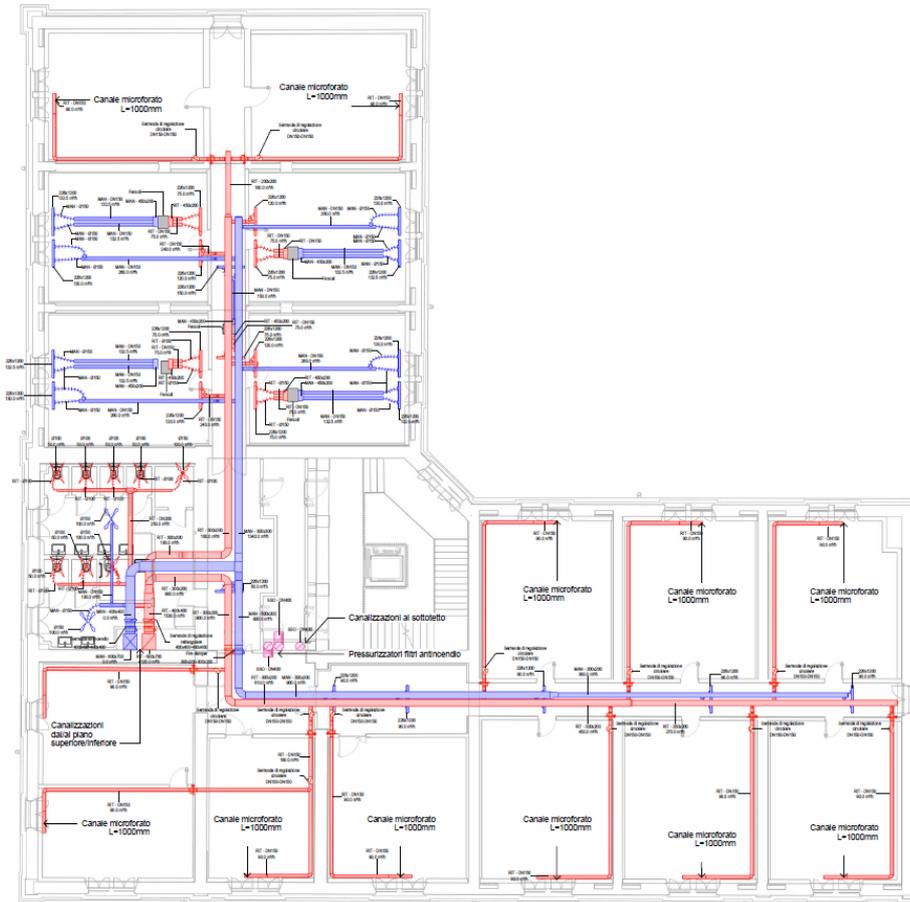


Figura 21 - Estratto planimetria primo piano del sistema di ventilazione

MODELLO IDRAULICO

L'impianto idraulico dell'edificio A è progettato per soddisfare i bisogni di acqua calda sanitaria, garantendo al contempo una distribuzione efficiente e bilanciata delle risorse idriche.

La generazione di ACS avviene per mezzo di uno scaldacqua a pompa di calore con una capacità di 110L, adeguatamente dimensionato per soddisfare il fabbisogno dell'edificio. Per quanto concerne la distribuzione dell'acqua calda e fredda, l'impianto è strutturato secondo un sistema a collettore. In tale configurazione, le tubazioni non raggiungono direttamente i terminali, ma si collegano a un collettore centrale, dal quale i flussi vengono distribuiti ai diversi punti di utenza.

L'adozione di tale sistema a collettore presenta vantaggi significativi rispetto al metodo tradizionale di collegamenti a T:

- Distribuzione equilibrata: il prelievo di acqua da una singola utenza non influenza la pressione e la portata delle altre;
- Rapidità di erogazione: grazie alla ridotta lunghezza dei circuiti di distribuzione, l'acqua calda è disponibile in tempi più rapidi;

- Flessibilità nella gestione delle utenze: la presenza di valvole di intercettazione dedicate consente di interrompere il flusso a una singola utenza senza influire sulle altre;
- Manutenzione semplificata: in caso di guasto o di intervento di manutenzione, è possibile operare su una singola utenza senza compromettere il funzionamento dell'intero impianto;
- Minore impatto estetico e invasivo: l'assenza di tubazione sottotraccia riduce la necessità di interventi murati e migliora l'accessibilità ai componenti dell'impianto.

Si riporta uno schema dell'impianto:

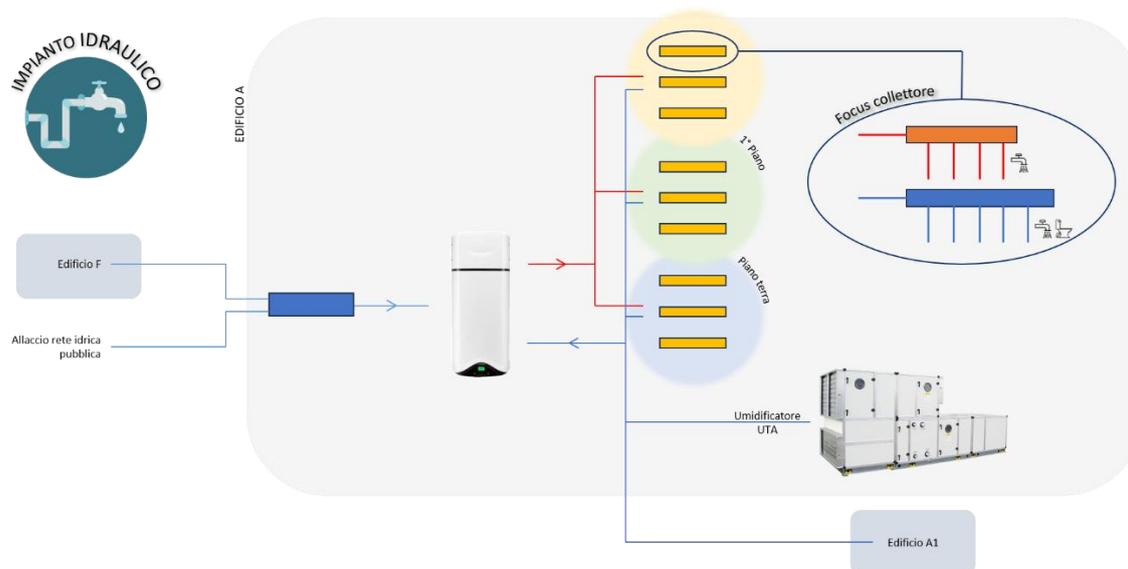


Figura 22 - Schema impianto di produzione ACS

Di seguito si riporta un estratto della progettazione dell'impianto idraulico, con particolare riferimento al primo piano dell'edificio:



Figura 23 - Estratto planimetria primo piano del sistema idraulico

3. ANALISI APE

In linea con la metodologia sviluppata, è stata condotta un'analisi approfondita dei dati contenuti nei file XML degli APE, con l'obiettivo di individuare le informazioni energetiche più rilevanti da trasferire e integrare nel modello BIM. L'attività di identificazione ha permesso di definire i parametri tecnici da mappare verso le entità IFC, al fine di garantire un'integrazione efficace e coerente tra modello geometrico e dati prestazionali.

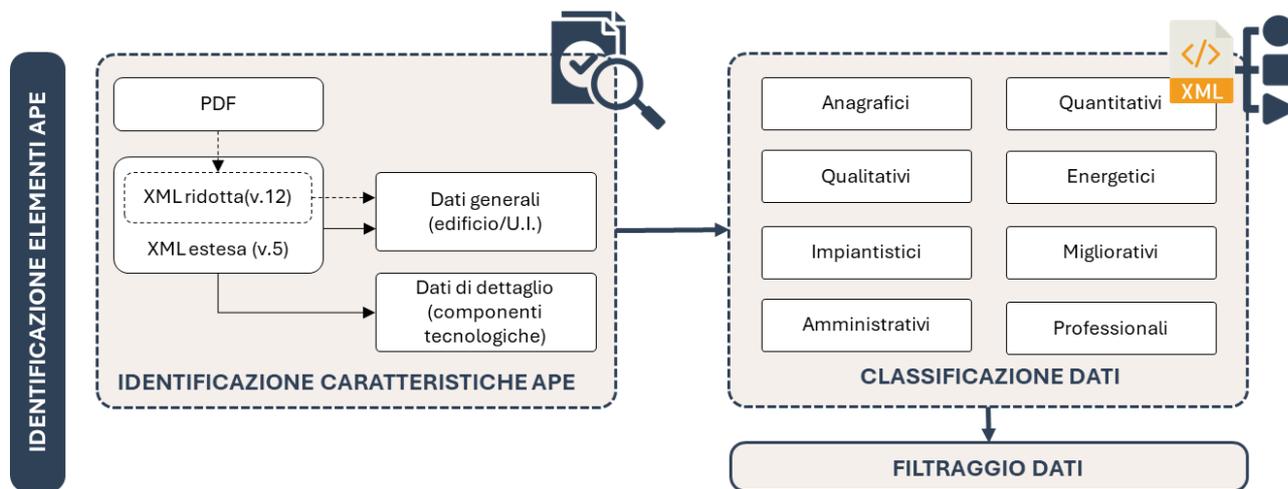


Figura 24 - Schema identificazione elementi APE

3.1 Identificazione caratteristiche APE

L'APE, formalmente noto come certificato energetico, è un documento tecnico-normativo che attesta le caratteristiche energetiche di un edificio o di un'unità immobiliare. Oltre a classificare l'edificio in base alla sua efficienza energetica, l'APE fornisce raccomandazioni per ottimizzare le prestazioni energetiche, valutate in termini di rapporto costi-benefici. Il documento fornisce una descrizione oggettiva e standardizzata delle performance energetiche dell'immobile, includendo dati quali:

- Il fabbisogno energetico annuo;
- La qualità energetica dell'involucro edilizio;
- Le emissioni di CO₂;
- Il livello di utilizzo delle fonti rinnovabili.

Tali informazioni si rivelano indispensabili non solo per la stima dei costi di esercizio, ma anche per la valutazione dell'impatto ambientale dell'edificio e per orientare il cittadino verso scelte più consapevoli in fase di acquisto, locazione o intervento edilizio (riqualificazione o ristrutturazione).

La prestazione energetica di un edificio viene definita come la quantità annua di energia primaria necessaria a soddisfare, in condizioni d'uso standardizzate, i fabbisogni relativi a: riscaldamento,

raffrescamento, ventilazione, produzione di acqua calda sanitaria e, nel caso di edifici non residenziali, anche illuminazione artificiale e funzionamento di ascensori e scale mobili.

A partire dal 2015, l'APE ha adottato un formato unificato a livello nazionale, con l'obiettivo di garantire maggiore chiarezza e confrontabilità delle informazioni. Le prime pagine del certificato riportano i dati essenziali destinati all'utente finale, agevolandone la lettura e la comprensione. In particolare, la sezione di maggiore interesse è quella relativa alla prestazione energetica globale del fabbricato, che rappresenta il dato sintetico più rilevante: la classe energetica assegnata all'unità immobiliare.

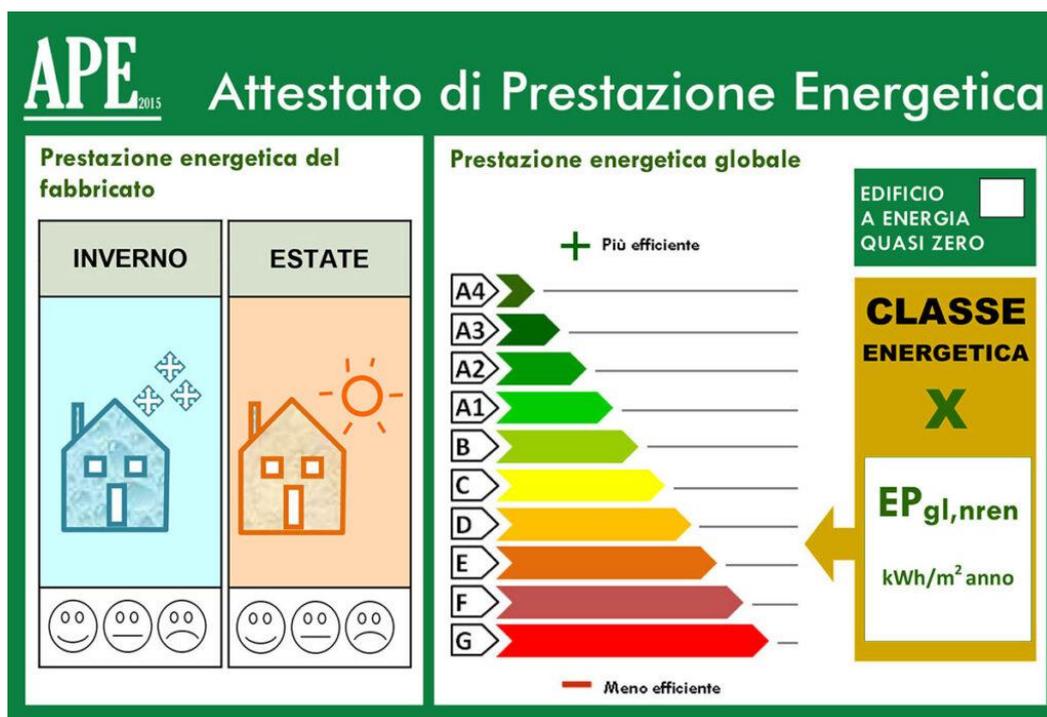


Figura 25 - Sezione Prestazione energetica globale e del fabbricato [52]

La classificazione energetica degli edifici è espressa mediante un sistema di indicatori alfabetici, dove la lettera A (e le relative sottoclassi, ad esempio A4) indica la classe di efficienza più elevata, mentre la lettera G identifica gli edifici con i consumi più alti.

Tuttavia, l'APE si presenta come un documento complesso e articolato, contenente una notevole quantità di informazioni che non sempre risultano immediatamente accessibili per il cittadino, ma che presentano un notevole valore tecnico per i professionisti del settore. In particolare, i dati trasmessi ai fini normativi e di monitoraggio energetico vengono inviati attraverso file XML, riconosciuti oggi come standard per la trasmissione telematica delle informazioni relative alla certificazione energetica, in particolare in ambito regionale. Nonostante permangano differenze tra i tracciati XML adottati dalle varie Regioni, è possibile individuare due principali tipologie di file [30]:

- Il formato “ridotto” (v.12) è caratterizzato dalla presenza esclusiva dei dati riportati nell'Attestato di Prestazione Energetica, conformemente al formato nazionale stabilito dal DM 26/06/2015;

- Il formato “esteso” (v.5) include, oltre alle informazioni contenute nell'APE, anche tutta una serie di dati di input (caratteristiche dell'edificio) e di output (risultati di calcolo intermedi e finali). [52] [53]

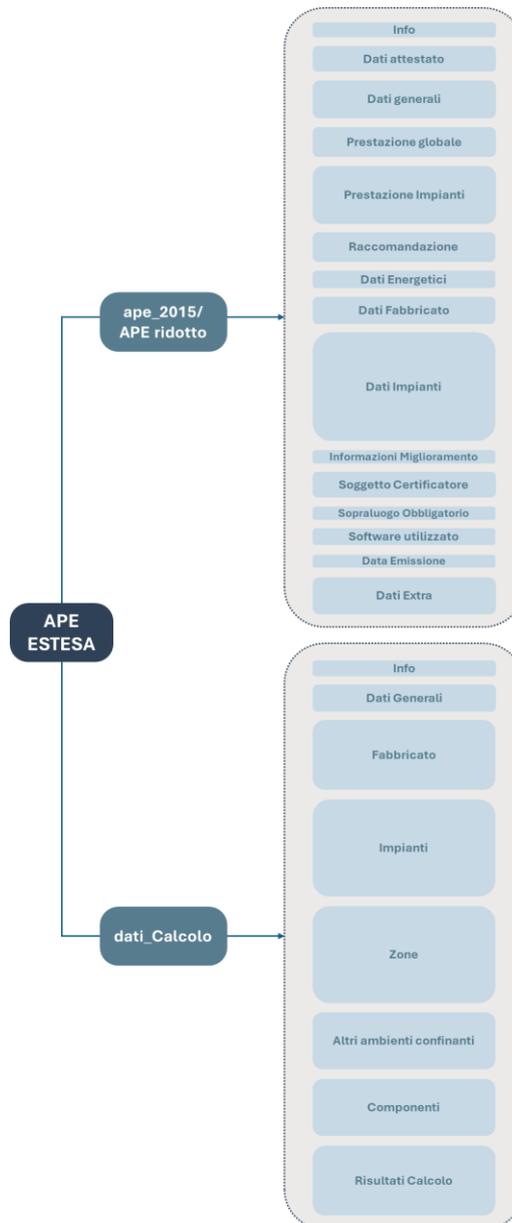


Figura 26 - Schema APE esteso

L'analisi condotta ha pertanto preso in considerazione la struttura dei file XML in formato esteso, giudicata più adeguata all'integrazione con i modelli BIM (Building Information Modeling), in quanto fornisce un quadro completo sia delle caratteristiche tecniche dell'edificio sia dei risultati energetici. Tali informazioni rappresentano il fondamento per la fase successiva di mappatura verso le entità IFC e per la generazione del modello digitale arricchito, in conformità con gli obiettivi del presente lavoro. Di seguito si presenta la rappresentazione grafica del XML, con un'attenzione particolare alla sezione dati_Calcolo:

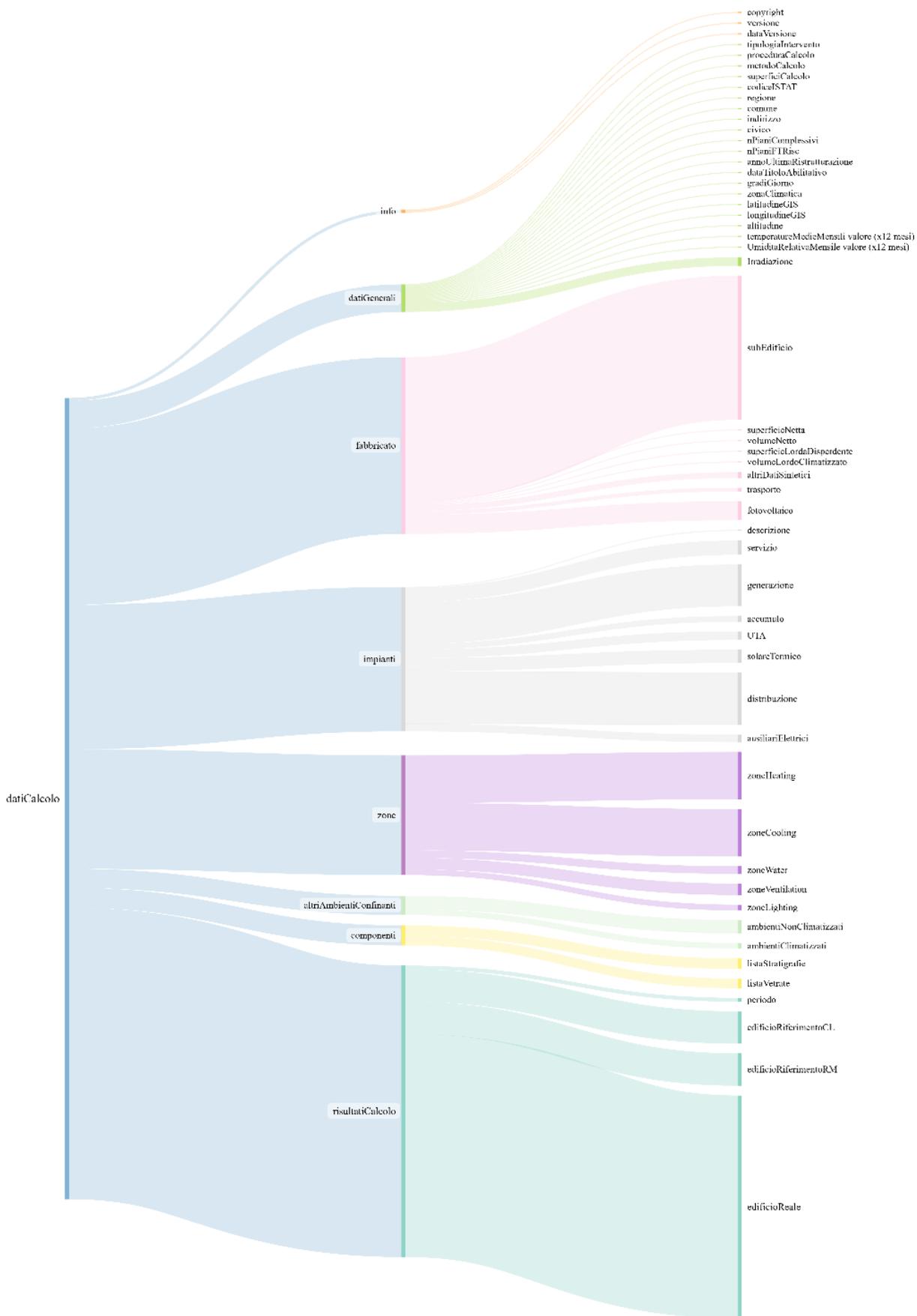


Figura 27 - Schema grafico XML sezione dati_Calcolo

3.2 Classificazione dati

L'APE, nella sua versione estesa, fornisce un'ampia gamma di informazioni tecniche che coprono diversi ambiti, tra cui dati anagrafici, caratteristiche energetiche, dettagli sugli impianti e proposte di intervento migliorativo. Tuttavia, tali dati non sono originariamente strutturati per un'integrazione ottimale con i modelli IFC: l'APE, infatti, è stato sviluppato per soddisfare specifici requisiti normativi e di certificazione, piuttosto che per garantire l'interoperabilità con gli standard openBIM.

I dati EPC forniscono una valutazione completa delle prestazioni energetiche, includendo consumi, isolamento, efficienza degli impianti e uso delle fonti rinnovabili. Lo standard IFC, invece, si concentra sulla rappresentazione digitale degli elementi edilizi, dei sistemi e delle loro relazioni lungo il ciclo di vita del cespite. Si rende pertanto necessario un approccio sistematico per tradurre e trasferire le informazioni energetiche dell'APE in una struttura coerente e compatibile con il framework IFC.

La versione estesa dell'attestato energetico include più di mille parametri. Al fine di facilitarne l'integrazione nel modello BIM, si è reso necessario un lavoro di classificazione e raggruppamento logico dei dati, al fine di rappresentare in modo coerente sia le caratteristiche fisiche sia le caratteristiche prestazionali degli oggetti edilizi. A tal fine, le informazioni sono state organizzate in otto cluster tematici principali, come illustrato nelle Figura 28 e Figura 29:

1. Dati anagrafici: informazioni che identificano l'edificio, come la localizzazione geografica, la destinazione d'uso, i riferimenti catastali;
2. Dati quantitativi: parametri numerici che descrivono dimensioni fisiche quali volume lordo, superfici, lunghezze e altezze;
3. Dati qualitativi: informazioni descrittive sull'edificio, come tipologia costruttiva, anno di costruzione o ristrutturazione, caratteristiche dell'involucro edilizio;
4. Dati energetici comprendono indicatori di sintesi come il fabbisogno globale di energia primaria, i consumi di energia primaria non rinnovabile e rinnovabile, le emissioni di CO₂, l'indice EP_{gl,nren} e la classe energetica dell'immobile;
5. Dati impianti: dettagli tecnici relativi agli impianti di climatizzazione, produzione di ACS, ventilazione, illuminazione e, se presenti, trasporto verticale. Sono inclusi dati su potenze, rendimenti, fonti di energia e sistemi di regolazione;
6. Dati migliorativi: raccomandazioni per interventi di retrofit finalizzati al miglioramento dell'efficienza energetica, con valutazione del rapporto costi-benefici.;
7. Dati documentali: informazioni sul certificato stesso, come data di emissione e scadenza, autorità competente, quadro normativo e tipologia di certificazione;
8. Dati certificatore: dati anagrafici e professionali del soggetto o ente che ha redatto l'APE, inclusi accreditamenti e contatti.

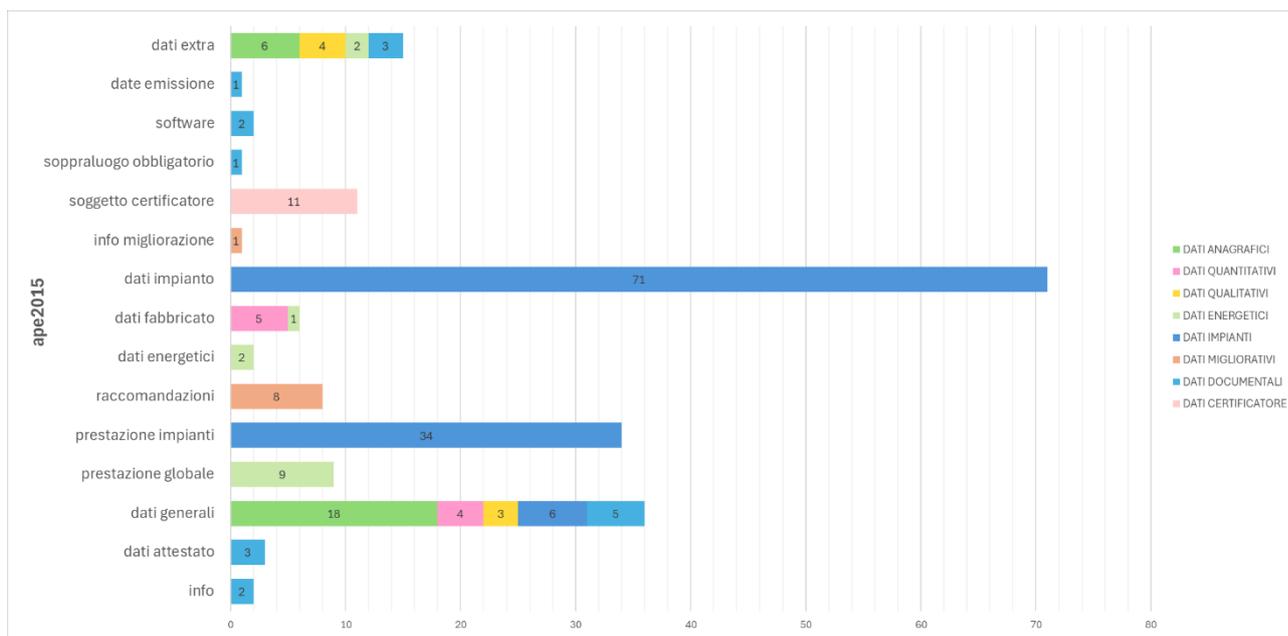


Figura 28 - Tabella dell'analisi dei dati nella sezione "ape2015"

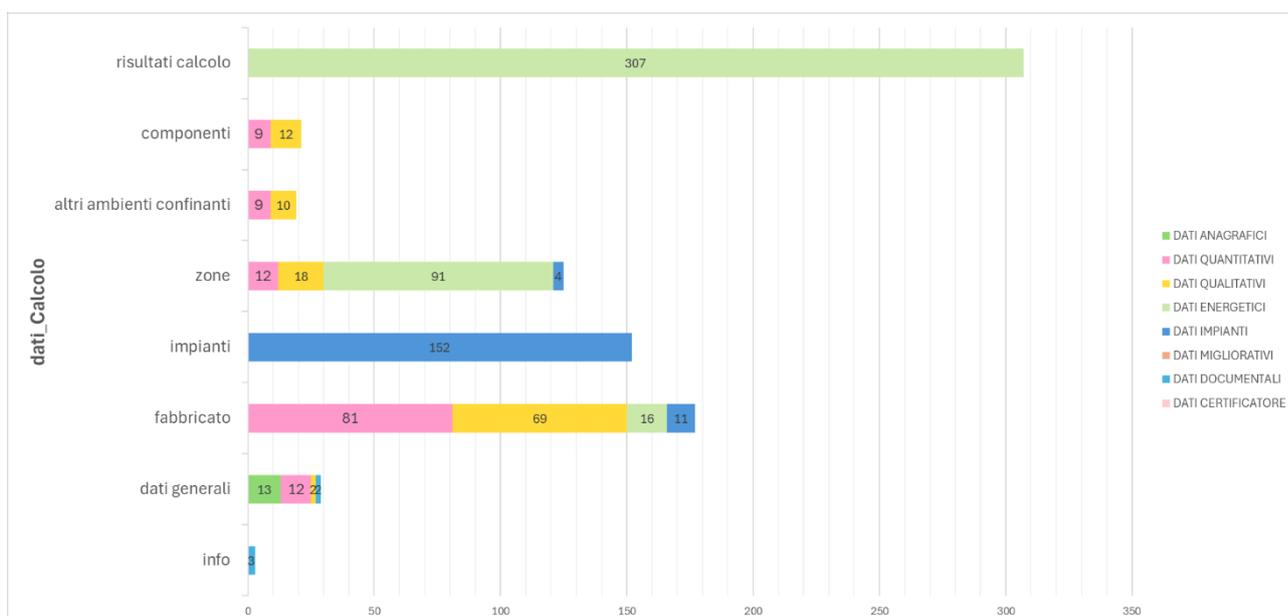


Figura 29 - Tabella dell'analisi dei dati nella sezione "dati_Calcolo"

Nonostante la suddivisione effettuata, l'analisi ha messo in luce una mancanza di coerenza semantica tra alcuni cluster. In particolare, sezioni come "dati generali" o "fabbricato" contengono informazioni eterogenee: ad esempio, nella sezione "dati generali" dell'APE si trovano parametri energetici, dati anagrafici (es. anno di costruzione) e informazioni quantitative. Tale unione complica il processo di traduzione verso il formato IFC, che richiede una categorizzazione logica e univoca per garantire un'interoperabilità corretta. Una rappresentazione grafica più esplicita di tale concetto è offerta dal grafico seguente, nel quale si evidenzia un'attenzione costante sulla sezione "Dati calcolo". Come illustrato

graficamente, i diversi elementi all'interno del cluster presentano un dominio distinto nell'APE, indicando l'appartenenza a sezioni distinte.

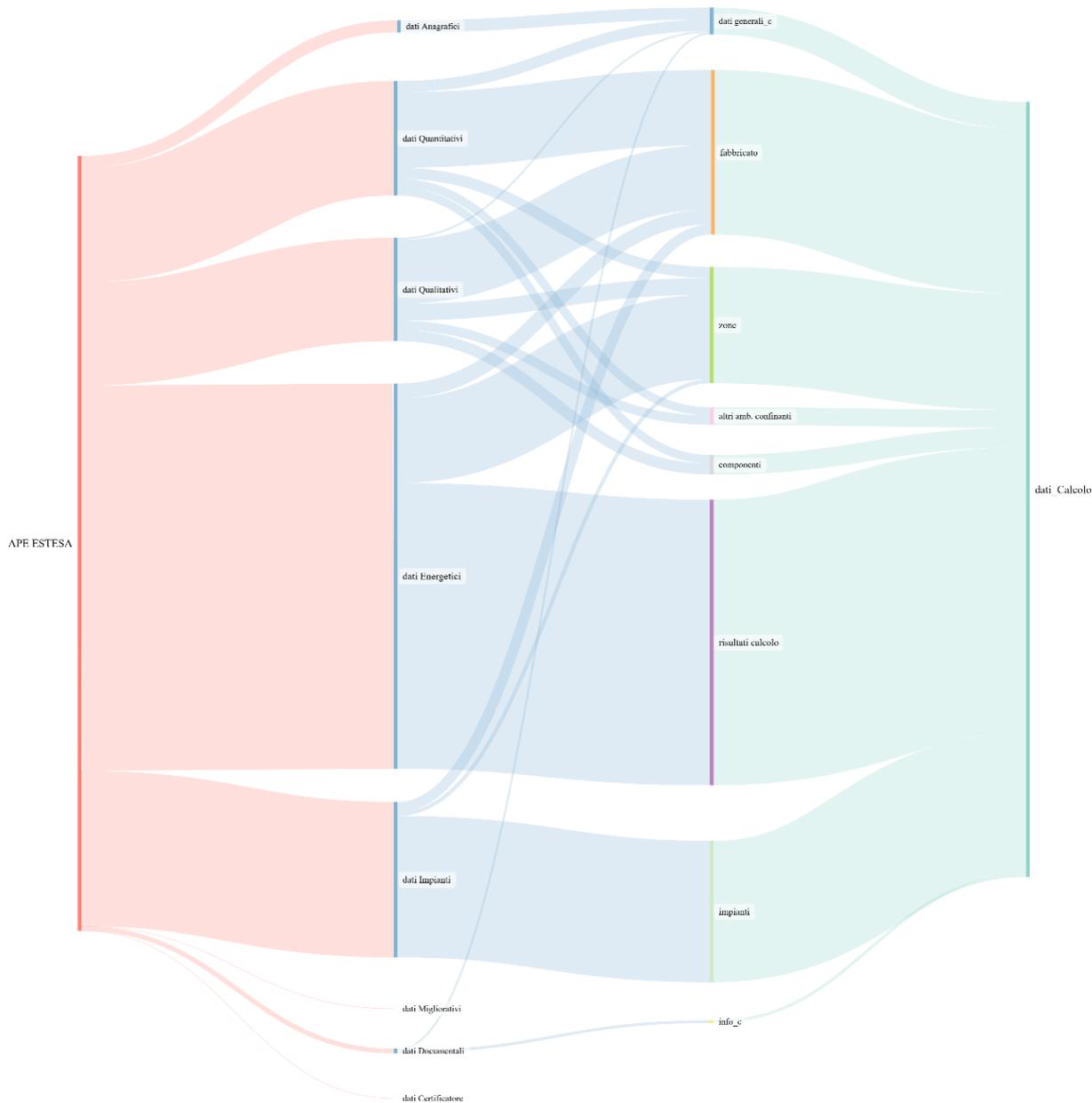


Figura 30 - Visualizzazione degli elementi appartenenti ai cluster e alle sezioni dell'APE

È importante evidenziare che la struttura gerarchica del file XML dell'APE non è casuale, ma è il risultato di logiche funzionali che ne garantiscono l'efficacia sia per la generazione del certificato che per applicazioni più avanzate, come l'integrazione con modelli BIM o con strumenti digitali di gestione come il DBL. Grazie a tale organizzazione, l'APE si configura come uno strumento strategico non solo per la certificazione, ma anche per la gestione, la manutenzione e la riqualificazione del patrimonio edilizio lungo tutto il suo ciclo di vita.

3.3 Filtraggio dati

Tuttavia, non tutti i dati contenuti nell'APE esteso risultano direttamente integrabili nella struttura predefinita dello standard IFC. In talune circostanze, le informazioni risultano carenti di compatibilità formale o non conformi ai requisiti dei flussi openBIM. Al fine di garantire un'integrazione coerente e funzionale, si è reso necessario procedere a un'attenta selezione e filtraggio delle informazioni, escludendo i dati non pertinenti, duplicati o difficilmente mappabili, al fine di preservare la coerenza semantica e l'efficienza del modello.

La procedura ha previsto diverse fasi:

- **Esclusione dei parametri duplicati**

Il primo passo ha previsto un confronto sistematico tra i dati dell'APE esteso e quelli contenuti nella versione standardizzata nazionale (sezione ape2015). Questo ha permesso di eliminare i campi duplicati e di ridurre il dataset alleggerendo così la struttura in vista delle successive operazioni di integrazione;

- **Rimozione dei parametri relativi al calcolo normativo**

Sono stati esclusi tutti i dati utilizzati esclusivamente per il calcolo energetico secondo la normativa vigente, in particolare quelli riferiti agli edifici di riferimento e alle condizioni di calcolo, che non rappresentano informazioni significative ai fini della modellazione o visualizzazione BIM;

- **Filtraggio delle informazioni poco significative**

In una fase successiva, è stata condotta un'ulteriore scrematura, focalizzata sull'eliminazione di informazioni non pertinenti rispetto agli obiettivi di interoperabilità e modellazione BIM. Il criterio guida è stato la pertinenza ai fini della visualizzazione e della simulazione, al fine di evitare un sovraccarico informativo del modello IFC. La Tabella 2 seguente sintetizza le categorie di dati esclusi e la relativa motivazione:

Tabella 2 - Sintesi dei parametri esclusi e motivazione

Categoria di Parametri Eliminati	Motivazione
Note software, fonti trasmittanza	Informazioni descrittive non essenziali
Corse giornaliere ascensore	Non rilevante rispetto a portata e tipologia
Dati mensili fotovoltaico	Sostituiti con valori annuali per sintesi
Temperature mensili tubazioni	Sostituite con temperatura media fluido

A seguito dell'intero processo di selezione, il numero complessivo di parametri è stato ridotto rendendo il dataset più agile, coerente e idoneo per l'integrazione nei modelli BIM e nelle simulazioni energetiche.

Al fine di comprendere l'impatto del filtraggio all'interno delle diverse aree informative, è stata condotta un'analisi della distribuzione dei parametri esclusi all'interno dei vari cluster individuati nella fase precedente. Tale analisi è illustrata nella Figura 31:

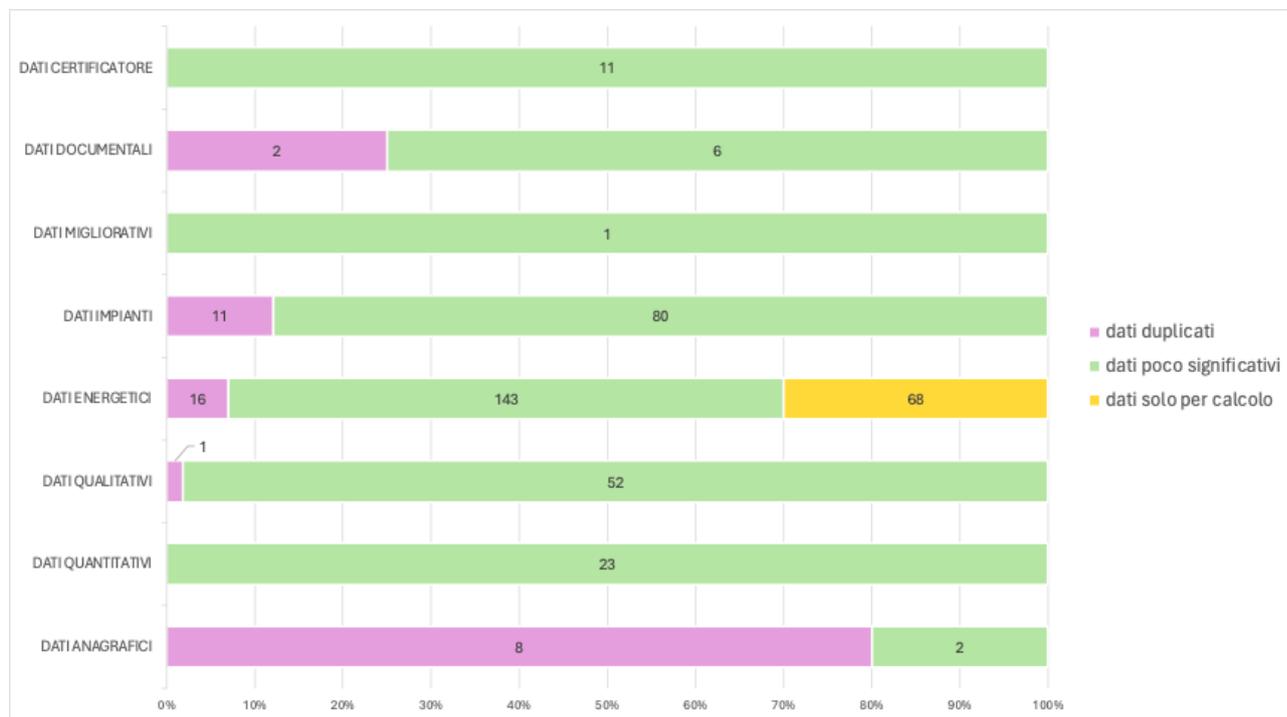


Figura 31 - Analisi dei parametri filtrati con lo schema dell'XML

L'analisi ha messo in luce una variazione nella densità informativa iniziale tra i diversi cluster, con alcuni gruppi che hanno subito una significativa riduzione e altri che sono stati completamente eliminati. Ad esempio, il cluster "Dati del certificatore" è stato escluso integralmente in quanto ritenuto non rilevante per le finalità operative e di interoperabilità dell'ambiente openBIM.

La razionalizzazione ha favorito una migliore organizzazione semantica dei dati e un incremento dell'efficienza nei processi di modellazione, esportazione e visualizzazione, contribuendo così a un flusso informativo affidabile e coerente.

4. DEFINIZIONE METODOLOGIA OPENBIM

In questa sezione si illustra la metodologia sviluppata per integrare i dati provenienti dal certificato energetico all'interno del modello digitale dell'edificio, in conformità con lo standard IFC, nell'ambito di un approccio OpenBIM. Il processo ha richiesto l'analisi e la definizione di corrispondenze tra i dati dell'attestato energetico e i principali standard nazionali e internazionali. L'obiettivo del progetto è stato quello di sviluppare una mappatura sistematica degli elementi informativi rilevanti, con l'obiettivo di facilitare lo scambio di dati e l'interoperabilità tra piattaforme e strumenti diversi, garantendo un flusso informativo continuo e strutturato negli ambienti BIM.

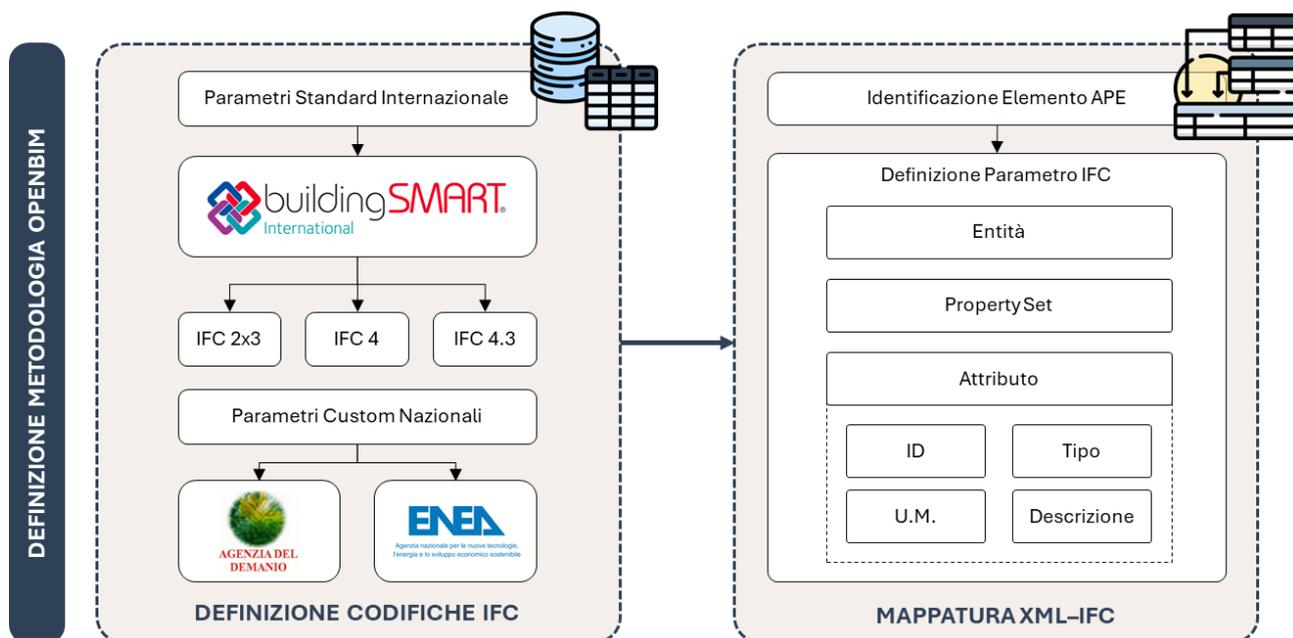


Figura 32 - Schema definizione metodologia OpenBIM

4.1 Mappatura XML-IFC

La definizione della mappatura tra i dati XML (derivanti dall'Attestato di Prestazione Energetica) e lo standard IFC ha richiesto un'analisi approfondita dei punti di contatto e delle divergenze tra le rispettive strutture informative. L'attività ha superato la mera corrispondenza tra attributi energetici e proprietà IFC, con l'obiettivo di garantire la coerenza semantica, la strutturazione e l'interoperabilità dei dati su piattaforme e ambienti digitali eterogenei.

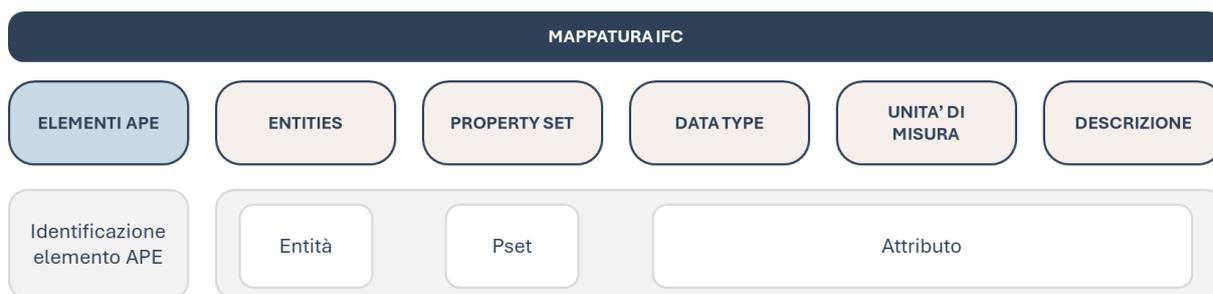


Figura 33 - Struttura mappatura IFC

Si è prestata particolare attenzione agli standard definiti da buildingSMART, considerando le versioni IFC2x3, IFC4 e IFC4.3. Tuttavia, l'uso esclusivo di tali riferimenti si è dimostrato insufficiente, poiché molte informazioni dell'APE sono strettamente legate al quadro normativo italiano, alle convenzioni nazionali di calcolo della prestazione energetica e ad aspetti amministrativi come la codifica catastale. Per tale ragione, la mappatura è stata integrata con le codifiche personalizzate sviluppate dall'Agenzia del Demanio e dall'ENEA, che rappresentano un livello aggiuntivo di strutturazione informativa a supporto della digitalizzazione del patrimonio edilizio.

In talune circostanze, la peculiarità delle informazioni contenute nell'APE non risulta direttamente compatibile né con gli standard internazionali né con quelli nazionali. In tali circostanze, si è reso necessario generare parametri personalizzati, mantenendo al contempo la coerenza con la struttura openBIM e garantendo tracciabilità e interoperabilità.

Il processo metodologico applicato per ciascun standard ha previsto i seguenti passaggi:

- Analisi delle strutture dati;
- Allineamento semantico tra attributi;
- Individuazione di eventuali discrepanze;
- Definizione di Property Set personalizzati, ove necessario.

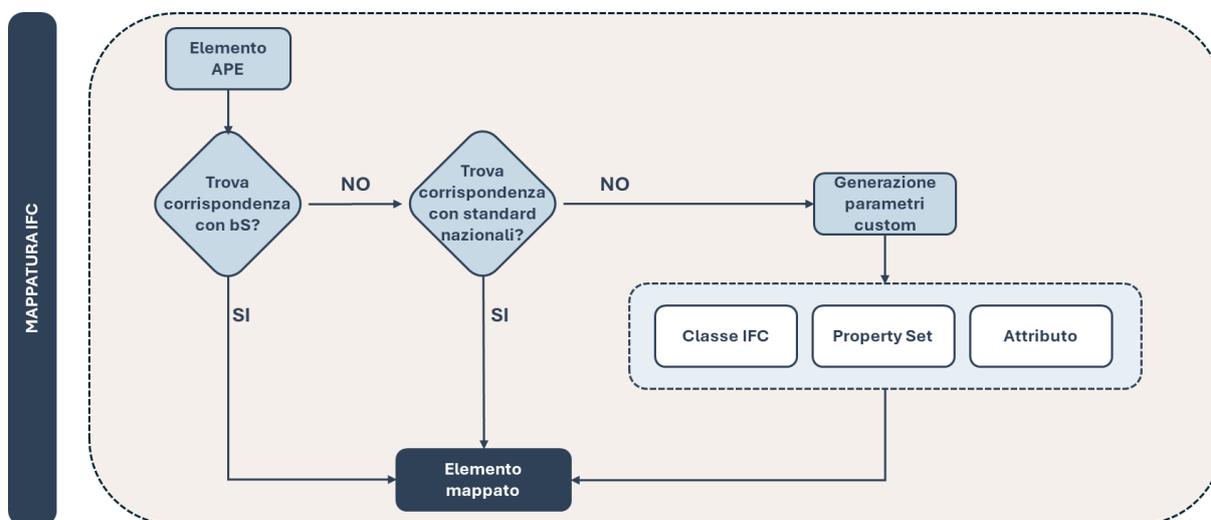


Figura 34 - Schema mappatura IFC

4.2 Definizione codifiche IFC

ANALISI DELLA COMPATIBILITÀ CON GLI STANDARD INTERNAZIONALI IFC

Ogni parametro è stato meticolosamente analizzato e confrontato con le specifiche delle versioni IFC2x3, IFC4 e IFC4.3, al fine di verificare la presenza e l'aderenza alle caratteristiche previste da ciascun standard.

- Tipologia (numerico, testuale, booleano, ecc.);
- Unità di misura;
- Campo semantico (concetto energetico o impiantistico di riferimento);
- Possibili ambiguità o criticità.

Nel caso specifico di IFC2x3, è stato condotto un esame per determinare quali parametri fossero già presenti e risultassero compatibili con i dati dell'APE esteso. Lo stesso approccio è stato applicato per IFC4 e IFC4.3, evidenziando i miglioramenti introdotti e l'incremento delle proprietà utili per la simulazione energetica. In particolare, IFC4.3 ha mostrato 23 corrispondenze in più rispetto a IFC4. Tuttavia, rimane imprescindibile l'integrazione di dati specifici per la rappresentazione di profili energetici dinamici, che richiede l'implementazione di campi personalizzati.

I Property Set ufficiali che rivestono maggior rilevanza in questo specifico contesto sono:

- *Pset_ElectricalDeviceCommon*, per le caratteristiche generali dei dispositivi elettrici;
- *Pset_EnergyRequirements*, per le informazioni sui fabbisogni energetici.

STANDARD NAZIONALI

A livello nazionale, in Italia sono già state adottate diverse definizioni di proprietà IFC personalizzate, progettate per rispondere a specifiche esigenze normative e operative. Tali mappature nazionali personalizzate riflettono la struttura e la semantica dei dati propri del contesto italiano, in particolare per quanto riguarda il settore energetico e la gestione del patrimonio edilizio. Tra gli enti di riferimento principali si annoverano l'Agenzia del Demanio (ADM) e l'ENEA (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile), che hanno sviluppato proprie codifiche IFC come framework di supporto alla digitalizzazione.

Mappatura secondo il BIMMS – Agenzia del Demanio

Nel presente lavoro, è stata condotta un'analisi di compatibilità tra i parametri dell'APE estesa e le specifiche IFC adottate dall'Agenzia del Demanio, sulla base delle Linee guida Produzione Informativa BIM del BIMMS (Building Information Modeling Method Statement) [54, 55, 56]. Le linee guida stabiliscono le modalità di creazione, condivisione e consegna dei modelli informativi, con l'obiettivo di garantire una gestione integrata dell'intero ciclo di vita dell'immobile e una collaborazione efficace tra i diversi attori coinvolti.

L'Agenzia del Demanio prevede che le proprietà relative a beni, fabbricati, impianti ed elementi siano organizzate all'interno di Pset dedicati. La struttura adottata si articola come segue:

CODIFICA PSET			
TIPO OGGETTO	Dati	TIPO PROPRIETA'	CODICE Pset
Nome dell'oggetto a cui è legato il Pset	Testo fisso		
Bene	Dati	Anagrafici	BeneDatiAnagrafici
Bene	Dati	Qualitativi	BeneDatiQualitativi

Bene	Dati	Quantitativi	BeneDatiQuantitativi
Bene		Documenti	BeneDocumenti
Fabbricato	Dati	Anagrafici	FabbricatoDatiAnagrafici
Fabbricato	Dati	Qualitativi	FabbricatoDatiQualitativi
Fabbricato	Dati	Quantitativi	FabbricatoDatiQuantitativi
Fabbricato		Documenti	FabbricatoDocumenti
Fabbricato	Dati	Strutturali	FabbricatoDatiStrutturali
Impianto	Dati	Qualitativi	ImpiantoDatiQualitativi
Impianto	Dati	Documenti	ImpiantoDocumenti
Spazio	Dati	Qualitativi	SpazioDatiQualitativi
Elemento	Dati	Anagrafici	ElementoDatiAnagrafici
Elemento	Dati	Documenti	ElementoDocumenti
Elemento	Dati	Qualitativi	ElementoDatiQualitativi
Elemento	Dati	Antincendio	ElementoDatiAntincendio
Elemento	Dati	Energetici	ElementoDatiEnergetici
Elemento		Codifica	ElementoCodifica

Tabella 3 - Rielaborazione codifica PSET [54]

Un aspetto rilevante riguarda la rappresentazione degli impianti: il Demanio prevede la possibilità di mappare tali sistemi sia come *IfcSystem* sia come *IfcElementAssembly*, privilegiando il primo per una gestione più appropriata e conforme ai principi openBIM.

Le linee guida stabiliscono altresì che i *Property Set* debbano essere associati a *IfcPropertySet*, mentre le singole proprietà devono essere associate a *IfcProperty*, delineando così una struttura che consente la gestione ordinata e tracciabile dei dati senza dover fare uso degli schemi predefiniti di buildingSMART. Questa scelta, sebbene favorisca la coerenza con il patrimonio pubblico nazionale, comporta una limitazione parziale dell'interoperabilità con gli standard internazionali, richiedendo una valutazione attenta delle strategie di mappatura più efficaci.

Mapping IFC	Concetto ADM	Set di proprietà	Proprietà	Descrizione
IfcSite	Bene			
IfcSite.BeneDatiAnagrafici.Denominazione	Bene	BeneDatiAnagrafici	Denominazione	Denominazione Immobile
IfcSite.BeneDatiAnagrafici.CodiceBene	Bene	BeneDatiAnagrafici	CodiceBene	Codice Bene
IfcSite.BeneDatiAnagrafici.Regione	Bene	BeneDatiAnagrafici	Regione	Regione
IfcSite.BeneDatiAnagrafici.Provincia	Bene	BeneDatiAnagrafici	Provincia	Provincia
IfcSite.BeneDatiAnagrafici.Comune	Bene	BeneDatiAnagrafici	Comune	Comune
IfcSite.BeneDatiAnagrafici.Indirizzo	Bene	BeneDatiAnagrafici	Indirizzo	Indirizzo
IfcSite.BeneDatiAnagrafici.Latitudine	Bene	BeneDatiAnagrafici	Latitudine	Latitudine del fabbricato
IfcSite.BeneDatiAnagrafici.Longitudine	Bene	BeneDatiAnagrafici	Longitudine	Longitudine del fabbricato
IfcSite.BeneDatiQualitativi.ZonaSismica	Bene	BeneDatiQualitativi	ZonaSismica	Analisi territoriale - Zona sismica
IfcSite.BeneDatiQualitativi.CategoriaTopografica	Bene	BeneDatiQualitativi	CategoriaTopografica	Analisi strutturale - Categoria topografica

Figura 35 - Esempio mappatura Demanio

ENEA

L'ENEA (Ente Nazionale per l'Efficienza Energetica) ha sviluppato specifiche codifiche IFC orientate principalmente alla rappresentazione digitale dei dati energetici e impiantistici. Tali codifiche, sebbene meno elaborate rispetto a quelle predisposte dall'Agenzia del Demanio in merito alla gestione complessiva del patrimonio immobiliare, costituiscono un contributo significativo alla digitalizzazione delle informazioni legate alla prestazione energetica degli edifici. Nel saggio [5], ENEA propone un approccio metodologico strutturato per l'integrazione delle informazioni derivanti dalla diagnosi energetica all'interno del modello informativo IFC. In particolare, si delineano specifiche mappe che introducono Property Set (Pset) personalizzati, concepiti per accogliere sia dati quantitativi che qualitativi rilevanti ai fini della valutazione energetica.

L'approccio proposto si sviluppa intorno a due principali Pset, associati all'entità *IfcBuilding* e conformi alle linee guida fornite dall'Agenzia del Demanio [54]. Il primo, denominato *Pset_BuildingQuantitativeData*, raccoglie parametri geometrici e dimensionali fondamentali per la simulazione energetica, quali la superficie utile riscaldata, il volume netto e lordo, la superficie disperdente e altri indicatori numerici funzionali al calcolo prestazionale. Il secondo, *Pset_BuildingEnergyData*, è finalizzato all'inserimento dei risultati diagnostici, includendo gli indici di prestazione suddivisi per vettore energetico, i consumi stimati, le emissioni associate e, se disponibile, un riferimento al report completo della diagnosi. La struttura dati in esame si configura come una soluzione efficace per superare le attuali limitazioni informative dei modelli IFC generati dai software di simulazione tradizionali, offrendo al contempo un'elevata versatilità e possibilità di riuso. Uno degli aspetti più rilevanti della proposta ENEA è proprio la sua natura estensibile, che consente di adattare il framework anche ad altri set informativi normativi.

In tale ambito, il presente lavoro di tesi ha adottato e sviluppato lo stesso schema concettuale, associando i dati estratti dall'APE esteso ai Pset identificati da ENEA, con l'obiettivo di ampliare i parametri mappati.

GENERAZIONE PARAMETRI CUSTOM

In circostanze in cui le codifiche disponibili, sia nazionali che internazionali, non risultino adeguate a coprire la specificità dei dati provenienti dall'APE, si rende necessario procedere alla definizione di parametri personalizzati. Il processo adottato si articola come segue:

1. Identificazione della classe IFC alla quale associare il nuovo attributo (ad esempio, *IfcBuilding*, *IfcSpace*, *IfcElement*);
2. Definizione del Property Set (*Pset*) specifico e del nome dell'attributo;

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica

3. Classificazione del tipo di dato (*IfcValue*), selezionando tra i tipi consentiti dallo standard: *IfcInteger*, *IfcReal*, *IfcText*, *IfcIdentifier*, *IfcDate*, *IfcBoolean*.
4. Redazione della descrizione dell'attributo, al fine di chiarirne lo scopo, l'applicazione e il contesto semantico, facilitando così la comprensione da parte degli utilizzatori del modello e favorendo la collaborazione multidisciplinare.

4.3 Risultati Mappatura

La versione IFC 4.3 rappresenta un'evoluzione significativa rispetto alla precedente IFC 4, introducendo un'estensione delle proprietà energetiche e una struttura più articolata per la descrizione dei sistemi tecnici. Tuttavia, permangono alcune criticità che rendono indispensabile l'integrazione con proprietà personalizzate, al fine di soddisfare i requisiti di interoperabilità richiesti dalla simulazione energetica dinamica, in particolare per quanto concerne dati temporali e parametri specifici non contemplati dagli standard ufficiali.

Tra i Property Set (Pset) attualmente disponibili e pertinenti per tali applicazioni si evidenziano:

- *Pset_ElectricalDeviceCommon*, per le caratteristiche generali dei dispositivi elettrici;
- *Pset_EnergyRequirements*, per le informazioni sui fabbisogni energetici.

L'analisi comparativa tra le mappature effettuate e i principali standard IFC ha messo in luce i seguenti aspetti:

- La versione IFC 4.3 consente una copertura parametrica decisamente più ampia, con 98 parametri mappati, rispetto ai soli 40 compatibili con la codifica adottata dall'Agenzia del Demanio;
- Le specifiche BIMMS introducono proprietà non previste negli standard IFC internazionali, come ad esempio la trasmittanza dei vetri;
- La struttura utilizzata dall'Agenzia del Demanio si discosta dagli schemi definiti da buildingSMART, ricorrendo a Property Set e attributi personalizzati direttamente associati alle entità IFC.

Nonostante l'ampliamento delle potenzialità introdotto con IFC 4.3, permangono lacune che ne limitano l'efficacia nella rappresentazione dinamica e temporale dei profili energetici, elemento fondamentale per una gestione energetica avanzata. È opportuno evidenziare che, in confronto alla versione IFC 2x3, la IFC 4 ha introdotto un livello di dettaglio superiore, in particolare nella modellazione dei sistemi tecnici. L'inserimento dell'entità *IfcDistributionSystem* consente una rappresentazione più precisa e flessibile delle reti impiantistiche e delle loro relazioni, facilitando il processo di correlazione con gli oggetti e i parametri dell'Attestato di Prestazione Energetica (APE).

L'analisi finale condotta sui formati IFC ha messo in luce come, nonostante lo standard IFC 4 rappresenti un'evoluzione rispetto alle versioni precedenti, esso non risulti ancora pienamente adeguato per una rappresentazione completa e strutturata delle informazioni richieste da una simulazione energetica avanzata. Per tale ragione, la scelta finale è ricaduta sulla versione IFC 4, considerata la più completa e coerente per un'efficace implementazione dei dati APE in ambiente BIM.

Tuttavia, l'integrazione diretta dei dati contenuti nell'APE all'interno del modello IFC rimane limitata, a causa di vincoli sia strutturali che semantici.

La Figura 36 illustra una rappresentazione grafica che sintetizza le corrispondenze tra i parametri dell'APE e quelli mappabili secondo gli standard IFC, sia a livello nazionale che internazionale.

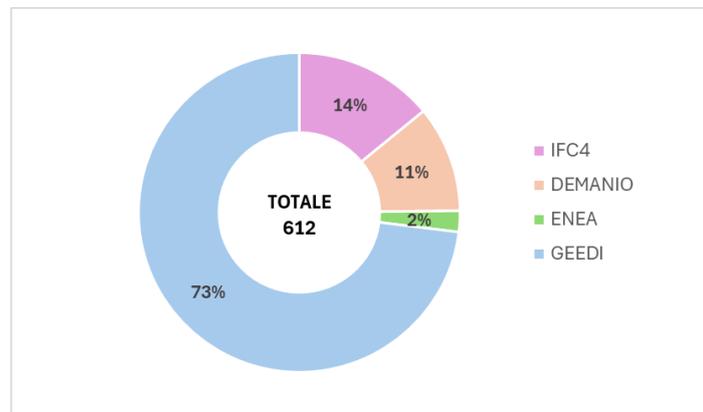


Figura 36 - Grafico delle corrispondenze nazionali e internazionali

Al termine del processo di mappatura, è stato sviluppato un grafico di sintesi (Figura 37), che illustra per ciascun parametro esaminato la tipologia di dato (quantitativo, qualitativo, energetico, ecc.) e il relativo cluster di appartenenza. Questo ha consentito di ottenere una comprensione più approfondita delle corrispondenze tra i diversi formati IFC.

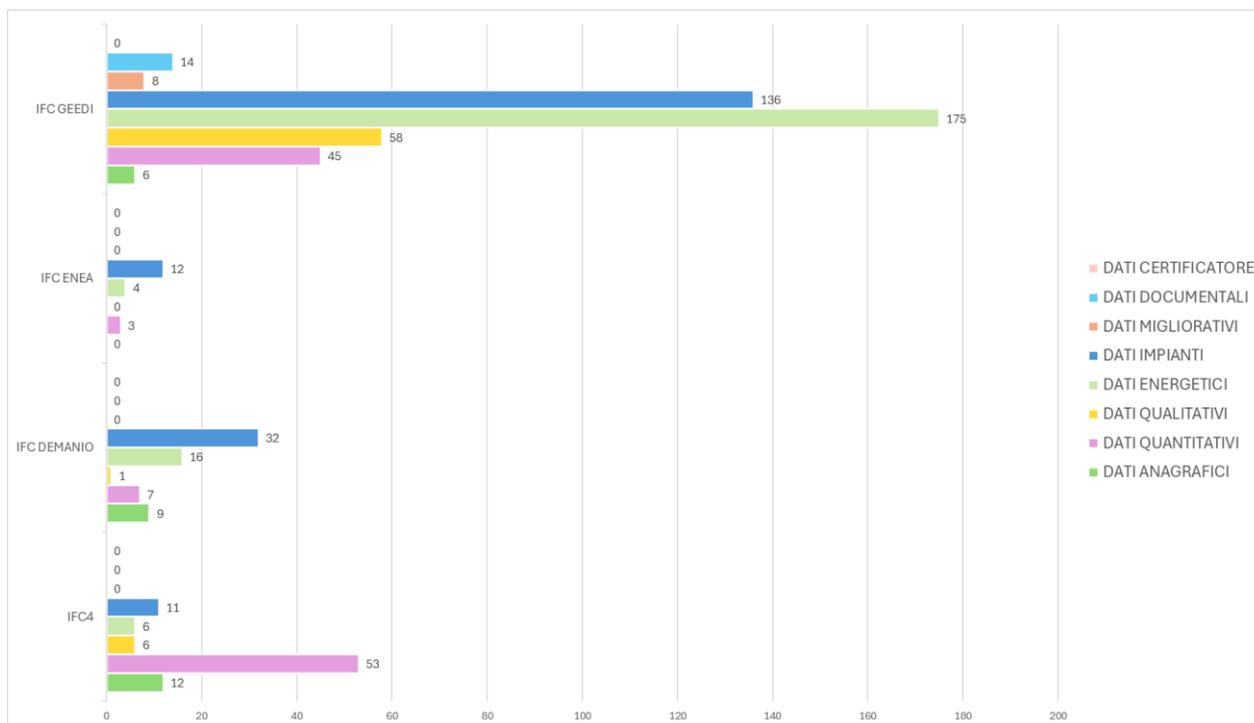


Figura 37 - Grafico dei cluster e delle tipologie di dato APE/IFC

Le corrispondenze tra parametri sono state rappresentate graficamente mediante il simbolo "X", come visibile in Figura 38, che riporta un estratto dell'

ALLEGATO A relativo alla mappatura dettagliata.

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica

LEGENDA:					
● Parametro selezionato					
XML APE_ESTESA		IFC4	IFC DEMANIO	IFC ENEA	IFC GEEDI
n.	parametri ape2015				
1	documento.ape2015.info.copyright				X
2	documento.ape2015.info.versione				X
3	documento.ape2015.datiAttestato.codiceISTATRegione				X
4	documento.ape2015.datiAttestato.codicedidentificativo				X
5	documento.ape2015.datiAttestato.dataScadenza				X
6	documento.ape2015.datiGenerali.classificazioneDPR412	X			
7	documento.ape2015.datiGenerali.oggettoAttestato				X
8	documento.ape2015.datiGenerali.numeroUnitaImmobiliari				X
9	documento.ape2015.datiGenerali.motivazione				X
10	documento.ape2015.datiGenerali.descrizioneAltraMotivazione				X
11	documento.ape2015.datiGenerali.datidentificativi.codiceISTAT				X
12	documento.ape2015.datiGenerali.datidentificativi.indirizzo	X			
13	documento.ape2015.datiGenerali.datidentificativi.piano	X			
14	documento.ape2015.datiGenerali.datidentificativi.interno	X			
15	documento.ape2015.datiGenerali.datidentificativi.LatitudineGIS	X			
16	documento.ape2015.datiGenerali.datidentificativi.LongitudineGIS	X			
17	documento.ape2015.datiGenerali.datidentificativi.zonaClimatica		X		
18	documento.ape2015.datiGenerali.datidentificativi.annoCostruzione	X			
19	documento.ape2015.datiGenerali.datidentificativi.superficieUtileRiscaldata		X		

Figura 38 - Estratto della mappatura IFC-XML

Inoltre, è stata condotta una classificazione delle variabili in base alle rispettive entità IFC di appartenenza, nei diversi cluster. La suddivisione proposta ha permesso di sviluppare un grafico rappresentativo (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), che sintetizza la loro allocazione tra le varie entità IFC, così da avere un'idea generale della corrispondenza tra i parametri dell'APE e le entità presenti nello schema IFC.

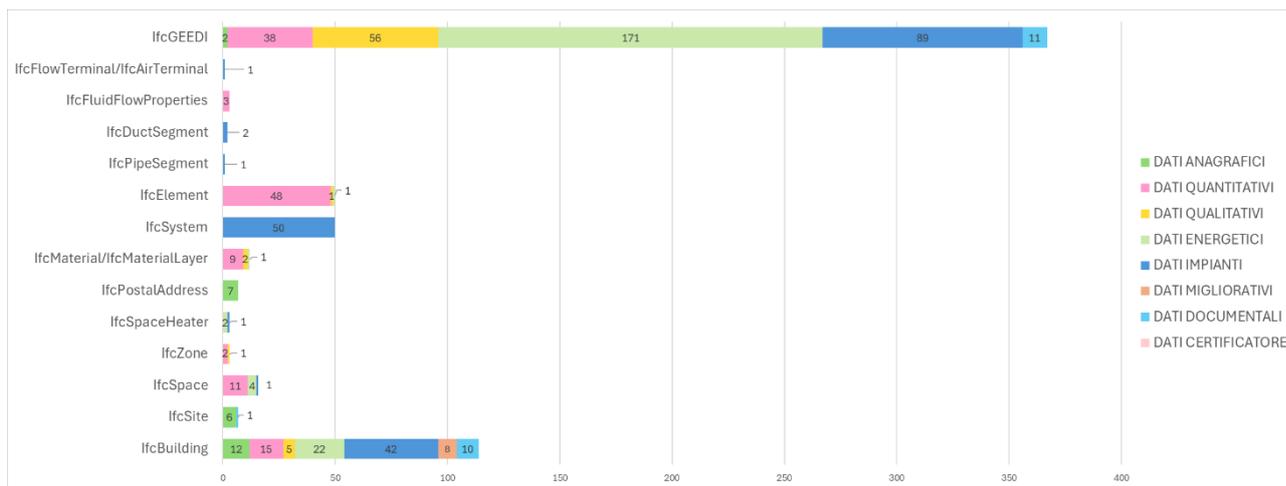


Figura 39 - Mappatura elementi IFC suddivisi per cluster

In particolare, è stata rivolta un'attenzione significativa ai parametri associati ai sistemi impiantistici, data la loro rilevanza per l'analisi energetica.

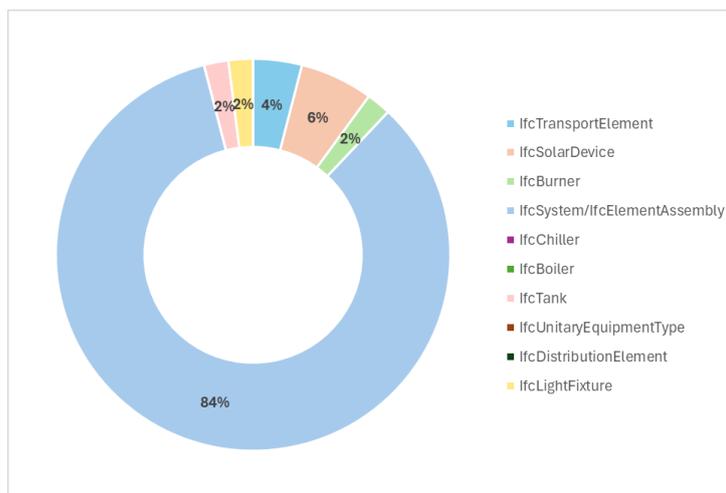


Figura 40 – Elementi APE relativi agli impianti e la loro mappatura IFC

L'approccio metodologico applicato per la mappatura si è rivelato efficace nel:

- Promuovere un trasferimento diretto e automatizzato dei dati dell'APE all'interno dei modelli BIM;
- Promuovere la generazione di digital twin orientati alla simulazione energetica e alla diagnosi prestazionale degli edifici rappresenta un obiettivo di cruciale importanza;
- Miglioramento della qualità e della standardizzazione dei dati, in conformità con le logiche OpenBIM;
- Al fine di garantire la coerenza tra il documento cartaceo che certifica la prestazione energetica e la modellazione digitale dell'edificio, è necessario ridurre le duplicazioni e le incongruenze.

La mappatura IFC-XML rappresenta pertanto un elemento strategico nel percorso di digitalizzazione delle informazioni energetiche, delineando le fondamenta per una futura integrazione con strumenti quali il DBL e il BRP, in conformità con le direttive europee sulla sostenibilità e sulla gestione del patrimonio edilizio pubblico.

5. VALIDAZIONE METODOLOGIA

La fase di validazione della metodologia proposta ha previsto l'implementazione pratica del flusso operativo descritto su un caso studio reale: la Caserma "Litta Modignani" di Pinerolo, oggetto di un progetto di rifunzionalizzazione sia energetica sia funzionale.

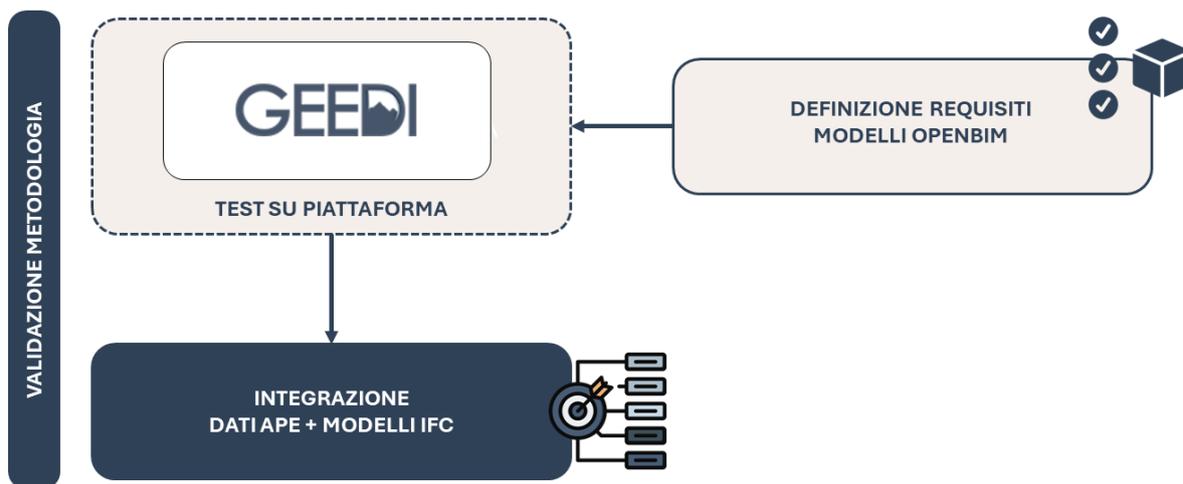


Figura 41 - Schema metodologico della fase validazione metodologia

L'obiettivo primario della validazione consiste nell'evidenziare la fattibilità tecnica e operativa dell'integrazione automatica dei dati contenuti nell'Attestato di Prestazione Energetica e nel modello IFC, mettendo in luce i benefici derivanti da un flusso informativo strutturato, trasparente e interoperabile. Tale approccio non solo supporta l'analisi energetica dell'edificio, ma anche il monitoraggio e la pianificazione degli interventi di riqualificazione nel lungo periodo, in coerenza con le logiche del Digital Building Logbook.

Per il caso in esame, è stata condotta una selezione mirata dei parametri energetici più rilevanti, includendo nel modello solo le informazioni necessarie all'analisi e alla costruzione del Logbook. Si è prestata particolare attenzione ai dati impiantistici, distinguendo tra i parametri contenuti nella sezione "Impianti" dell'APE e quelli distribuiti in altre sezioni del certificato.

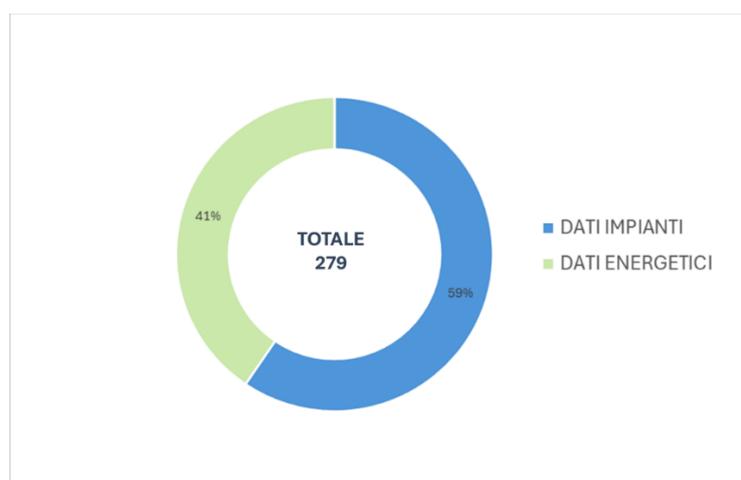


Figura 42 – Distribuzione dei dati impiantistici nei cluster APE

I parametri più significativi della sezione "Impianti" da includere nel processo di matching sono stati identificati come segue.

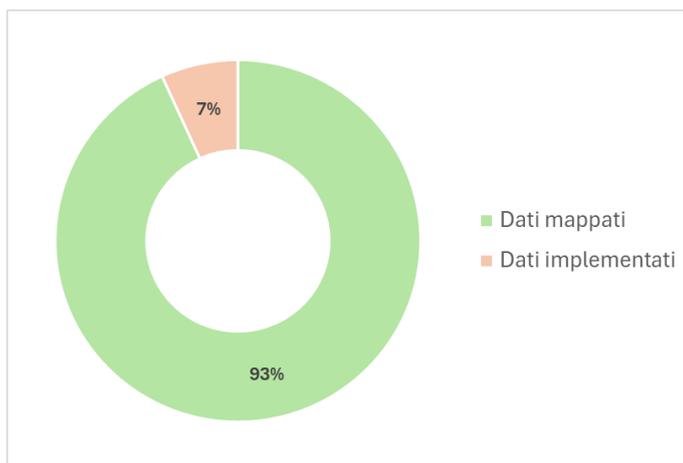


Figura 43 - Individuazione dei parametri che verranno implementati

La finalità della validazione è quella di valutare l'efficacia e la fattibilità tecnica dell'integrazione tra i file IFC e i file XML dell'APE, con un'attenzione particolare rivolta alla coerenza semantica delle informazioni, alla correttezza delle classificazioni adottate e alla capacità del visualizzatore GEEDI di generare un modello informativo arricchito, conforme ai principi dell'OpenBIM.

5.1 Processo di validazione

Il processo ha focalizzato l'attenzione sulle fasi di esportazione del modello da Revit e di successiva importazione nel visualizzatore GEEDI, con l'obiettivo di testare diverse strategie di modellazione e impostazioni di esportazione. Tra i formati disponibili, è stato selezionato l'IFC4, ritenuto il più completo per rappresentare le informazioni energetiche richieste dall'APE e il più adatto per la gestione dei dati all'interno del sistema GEEDI, che consente la fusione tra dati geometrici e dati energetici attraverso il sistema di mappatura sviluppato nella fase metodologica.

La procedura di validazione è stata articolata in scenari distinti, ciascuno focalizzato su un sistema impiantistico specifico dell'edificio. L'analisi è stata condotta su tre impianti: uno di ventilazione meccanica, uno di climatizzazione e uno destinato alla produzione di acqua calda sanitaria. La modellazione è stata condotta su sezioni specifiche dell'edificio: il secondo piano è stato destinato agli impianti di climatizzazione e ventilazione, mentre il primo piano è stato utilizzato per l'acqua calda sanitaria. La scelta è stata dettata dalla necessità di contenere la complessità computazionale e di focalizzarsi sulla componente impiantistica, escludendo il modello architettonico completo che, pur essendo stato utilizzato come riferimento geometrico, non è stato oggetto diretto dell'analisi.

Una volta sviluppati i modelli impiantistici, è stato necessario testarli in termini di requisiti di esportazione e caratteristiche necessarie per garantire la piena compatibilità con l'integrazione dei dati APE. Tali test hanno consentito di stabilire un insieme di criteri utili a garantire l'efficacia del processo, sia nel caso di inserimento manuale dei dati, sia nel caso di integrazione automatizzata tramite il visualizzatore sviluppato nell'ambito del progetto GEEDI.

I modelli ottenuti, definiti "IFC arricchiti", costituiscono un risultato tangibile della sperimentazione: si tratta di file in cui le entità geometriche e impiantistiche vengono arricchite con i dati energetici provenienti dall'APE, generando così una rappresentazione digitale più completa, strutturata e funzionale all'analisi energetica e alla gestione del ciclo di vita dell'edificio.

A conferma di quanto esposto, la Figura 44 illustra lo schema che sintetizza i passaggi cruciali del processo di validazione, dall'elaborazione dei modelli alla generazione finale degli IFC arricchiti.

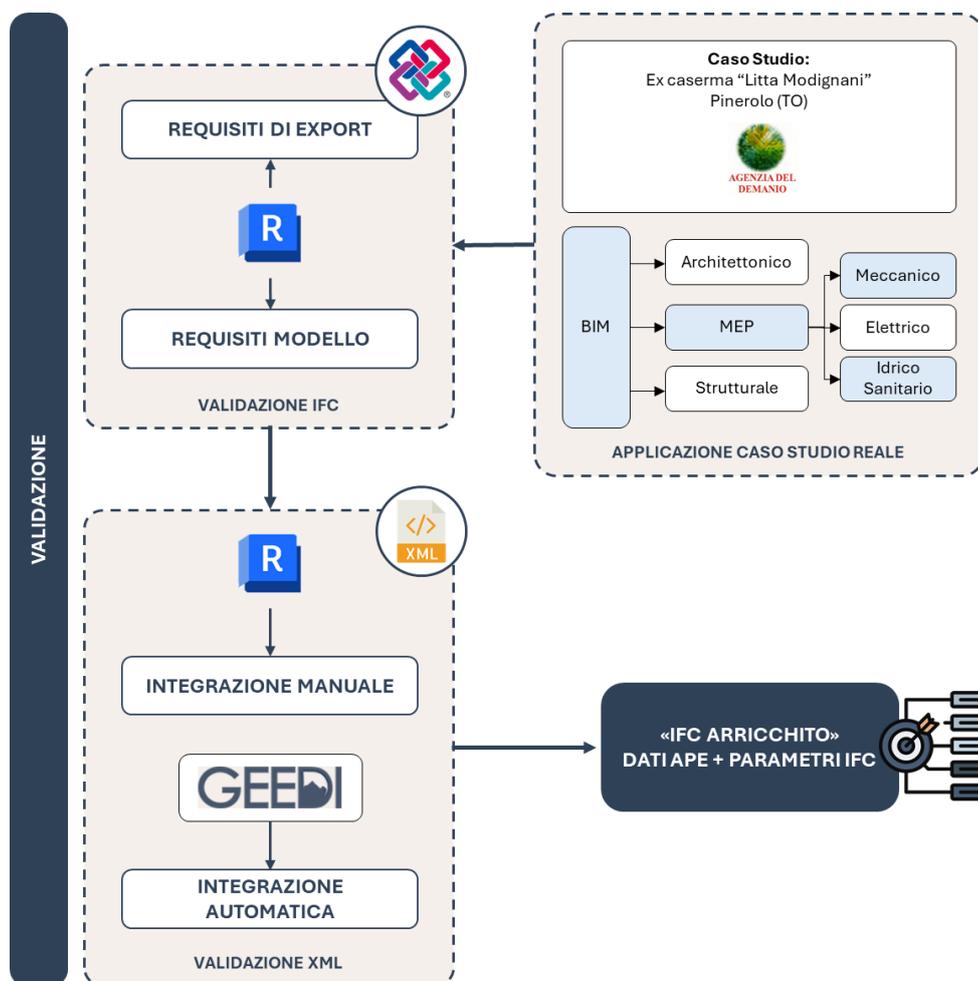


Figura 44 - Schema validazione

5.1.1 Validazione IFC

REQUISITI DI ESPORTAZIONE

La prima fase del processo di validazione ha previsto l'esame dei modelli impiantistici esportati da Revit senza alcuna modifica preliminare alle impostazioni di esportazione IFC. L'obiettivo del progetto era quello di valutare il comportamento del sistema in condizioni standard, al fine di individuare eventuali criticità nella codifica semantica degli oggetti. Successivamente, i file IFC generati sono stati analizzati

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica mediante strumenti di visualizzazione come *IfcViewer* e *BIMVision*, al fine di verificare la correttezza della classificazione degli oggetti e la presenza delle informazioni funzionali e tecniche necessarie.

Dall'analisi preliminare delle opzioni predefinite di esportazione, è emersa una criticità significativa: la maggior parte degli elementi impiantistici veniva esportata con la generica classificazione *IfcBuildingElementProxy*. La natura non specifica di questa categoria non consente di distinguere in modo univoco la funzione o le caratteristiche energetiche dell'elemento, compromettendo la qualità semantica del modello e limitando fortemente le potenzialità di integrazione con i dati APE.

Al fine di approfondire tale fenomeno, sono stati testati due diversi approcci. Il primo ha previsto l'esportazione con le impostazioni predefinite, utile a comprendere le limitazioni della procedura standard. Il secondo approccio, invece, ha introdotto modifiche mirate alle famiglie Revit, alle classificazioni e alle proprietà IFC, con l'obiettivo di ottimizzare la compatibilità con i dati energetici e migliorare la leggibilità degli oggetti nel visualizzatore GEEDI.

I risultati ottenuti con l'esportazione predefinita hanno confermato le criticità attese. Nei modelli relativi agli impianti di climatizzazione e ventilazione, numerosi oggetti venivano codificati come *IfcBuildingElementProxy*, rendendo difficile una loro interpretazione semantica. La Figura 45 mostra un esempio di tale classificazione, mentre la Figura 46 evidenzia la presenza diffusa di tali elementi all'interno dell'impianto meccanico del piano terra.

Attrezzature e tubazioni system

Classi di esportazione IFC: C:\ProgramData\Autodesk\RVT 2024\exportlayers-ifc-IAL.txt		
Categoria Revit	Nome classe IFC	Tipo IFC
<Linee nascoste>	IfcElectricApplianceType	
Attrezzature speciali	IfcBuildingElementProxy	
<Linee nascoste>	IfcBuildingElementProxy	
ADA Clearance	IfcBuildingElementProxy	
ANTINCENDIO	IfcBuildingElementProxy	
Burner	IfcBuildingElementProxy	
Burners	IfcBuildingElementProxy	
Clearance	IfcBuildingElementProxy	
Cook top	IfcBuildingElementProxy	
ELETTRICI E SPECIALI	IfcBuildingElementProxy	
Elevator - 2 Continuous	IfcBuildingElementProxy	
Elevator - 3 Continuous	IfcBuildingElementProxy	
Elevator - 4 Continuous	IfcBuildingElementProxy	
Elevator Door	IfcBuildingElementProxy	
Elevator Frame	IfcBuildingElementProxy	
Panel	IfcBuildingElementProxy	
Plan Rep	IfcBuildingElementProxy	

Classi di esportazione IFC: C:\ProgramData\Autodesk\RVT 2024\exportlayers-ifc-IAL.txt		
Categoria Revit	Nome classe IFC	Tipo IFC
Curve di livello secondarie	IfcSite	
Punto di contorno	IfcSite	
Punto interno	IfcSite	
Travi reticolari strutturali	IfcAssembly	TRUSS
Simboli bacchetta	IfcAssembly	
Tubazioni	IfcPipeSegment	
Caduta	IfcPipeSegment	
Dislivello	IfcPipeSegment	
Linea d'asse	IfcPipeSegment	
Simboli separazione idraulica	IfcPipeSegment	
Tubazioni di fabbricazione MEP	IfcBuildingElementProxy	
Caduta	IfcBuildingElementProxy	
Dislivello	IfcBuildingElementProxy	
Isolamento	IfcBuildingElementProxy	
Linea d'asse	IfcBuildingElementProxy	
Simbologia	IfcBuildingElementProxy	
Tubazioni flessibili	IfcPipeSegment	FLEXIBLESEGMENT
Linea d'asse	IfcPipeSegment	
Motivo	IfcPipeSegment	

Condotti e canaline system

Classi di esportazione IFC: C:\ProgramData\Autodesk\RVT 2024\exportlayers-ifc-IAL.txt		
Categoria Revit	Nome classe IFC	Tipo IFC
Riferimento	IfcBuildingElementProxy	
Saldature	IfcBuildingElementProxy	
Simbolo	IfcBuildingElementProxy	
Collocazioni condotto	IfcDuctSegment	
Collocazioni tubazione	IfcPipeSegment	
Condotti di fabbricazione MEP	IfcBuildingElementProxy	
Caduta	IfcBuildingElementProxy	
Dislivello	IfcBuildingElementProxy	
Isolamento	IfcBuildingElementProxy	
Linea d'asse	IfcBuildingElementProxy	
Rivestimento	IfcBuildingElementProxy	
Simbologia	IfcBuildingElementProxy	

Classi di esportazione IFC: C:\ProgramData\Autodesk\RVT 2024\exportlayers-ifc-IAL.txt		
Categoria Revit	Nome classe IFC	Tipo IFC
RL-txt	Non esportato	
SC-NERE	Non esportato	
TESTI	Non esportato	
Canaline di fabbricazione MEP	IfcBuildingElementProxy	
Caduta	IfcBuildingElementProxy	
Dislivello	IfcBuildingElementProxy	
Linea d'asse	IfcBuildingElementProxy	
Simbologia	IfcBuildingElementProxy	

Figura 45 - Esempio di elementi impiantistici classificati come IfcBuildingElementProxy

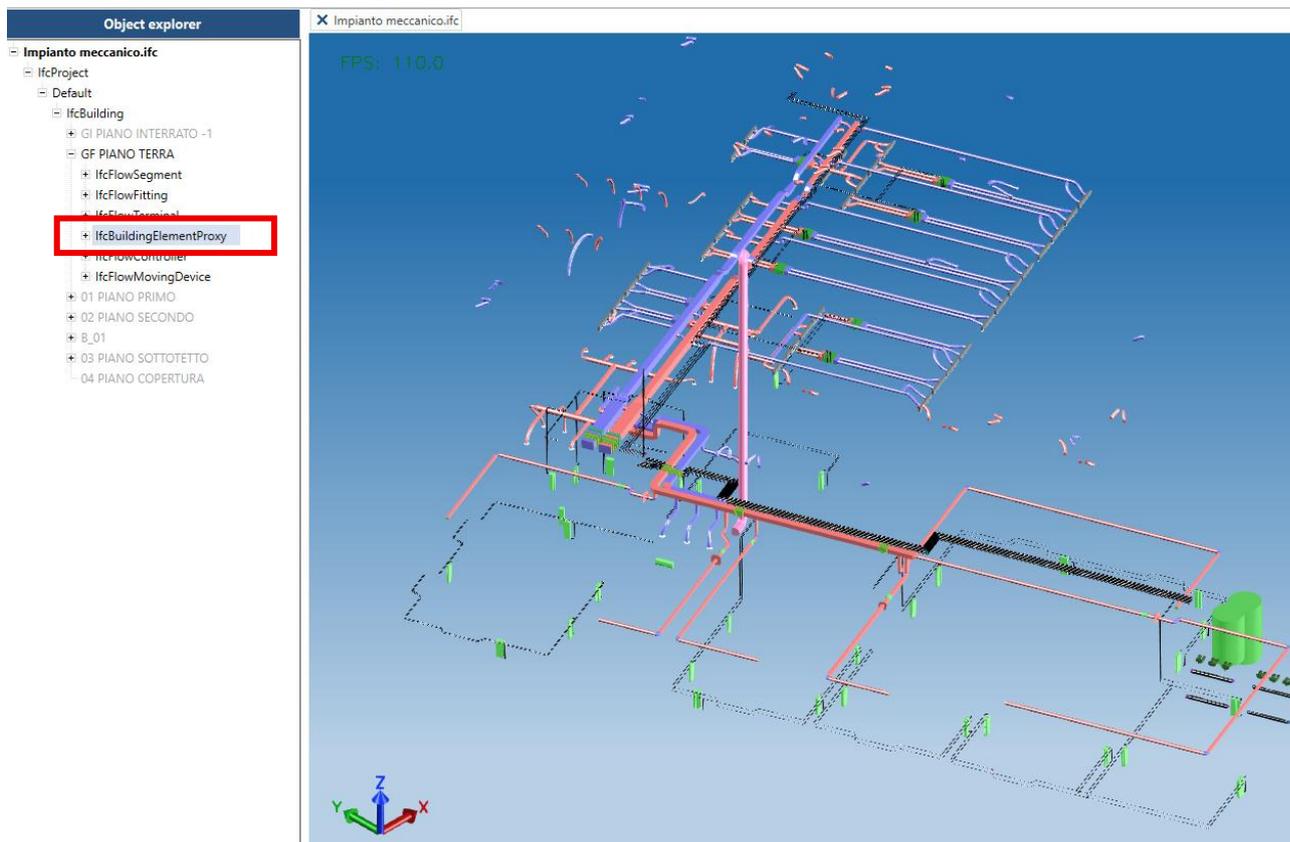


Figura 46 - Elementi IfcBuildingElementProxy nell'impianto meccanico

Un caso particolarmente significativo riguarda i radiatori, il cui export ha prodotto oggetti privi di classificazione funzionale e con proprietà incomplete. Tale mancanza si riflette anche nei file XML associati, dove le informazioni risultano parziali o totalmente assenti, come mostrato in Figura 47.

```

146971 <IfcBuildingElementProxyType id="3hqpQsS59TusYXysv$jt4" Name="TER-RAD-Termoarredo-01;TER-RAD-NNNW-01" Tag="3243132"
146972 <IfcBuildingElementProxyType id="3_ytehGh990xVYGKtLcw_N" Name="TER-RAD-Termoarredo-01;TER-RAD-NNNW-01" Tag="3243132"
146973 <IfcBuildingElementProxyType id="3_ytehGh990xVYGKtLcw$5" Name="TER-RAD-Termoarredo-01;TER-RAD-NNNW-01" Tag="3243132"
146974 <IfcBuildingElementProxyType id="2KlOnfjb5BZPvqOu0auH25" Name="TER-RAD-Termoarredo-01;TER-RAD-NNNW-01" Tag="3243132"
146975 <IfcBuildingElementProxyType id="0RCcTUq3b1dRRbTtS8pFF1" Name="TER-RAD-Termoarredo-01;TER-RAD-NNNW-01" Tag="3243132"
146976 <IfcBuildingElementProxyType id="3DXwgGr$L1ie6j_Q5ZwVFi" Name="TER-RAD-Termoarredo-01;TER-RAD-NNNW-01" Tag="3243132"
146977 <IfcBuildingElementProxyType id="3DXwgGr$L1ie6j_Q5ZwVfU" Name="TER-RAD-Termoarredo-01;TER-RAD-NNNW-01" Tag="3243132"
    
```

Figura 47 - Esempio rappresentazione XML del radiatore IfcBuildingElementProxy

Diversamente, per l'impianto idraulico i risultati si sono rivelati leggermente migliori. In questo caso, alcune classi IFC, come ad esempio i terminali e i condotti, sono state esportate correttamente già con le impostazioni di default. Tuttavia, anche in questo ambito si sono riscontrate situazioni di classificazione non adeguata, come nel caso del generatore termico (*burner*), che non veniva riconosciuto con la corretta classe IFC. In Figura 48 si può osservare un focus sulle problematiche relative all'esportazione di attrezzature speciali come pompe di calore, che richiedono interventi correttivi per una rappresentazione accurata.

Classi di esportazione IFC: C:\ProgramData\Autodesk\RVT 2024\exportlayers-ifc-IAI.txt

Categoria Revit	Nome classe IFC	Tipo IFC
Attrezzatura per servizi alim	IfcElectricApplianceType	
<Linee nascoste>	IfcElectricApplianceType	
Attrezzature speciali	IfcBuildingElementProxy	
<Linee nascoste>	IfcBuildingElementProxy	
ADA Clearance	IfcBuildingElementProxy	
Burner	IfcBuildingElementProxy	
Burners	IfcBuildingElementProxy	
Clearance	IfcBuildingElementProxy	
Cook top	IfcBuildingElementProxy	
Elevator - 2 Continuous	IfcBuildingElementProxy	
Elevator - 3 Continuous	IfcBuildingElementProxy	
Elevator - 4 Continuous	IfcBuildingElementProxy	
Elevator Door	IfcBuildingElementProxy	
Elevator Frame	IfcBuildingElementProxy	
Panel	IfcBuildingElementProxy	
Plan Rep	IfcBuildingElementProxy	
Bocchettoni	IfcAirTerminal	
Grate - Linee di griglia	IfcAirTerminal	
Campitura	IfcAnnotation	
Canaline di fabbricazione ME	IfcBuildingElementProxy	

Figura 48 - Classi di esportazione IFC focus sulle attrezzature speciali

La verifica visiva all'interno del visualizzatore OpenIFC ha confermato questi risultati. Nella maggior parte dei casi, l'impianto idraulico veniva visualizzato correttamente, con gli oggetti identificati secondo le classi appropriate. Tuttavia, il generatore risultava ancora rappresentato come *IfcBuildingElementProxy*, mentre l'UTA, collegata all'impianto idrico per la funzione di umidificazione, veniva invece correttamente visualizzata Figura 49.

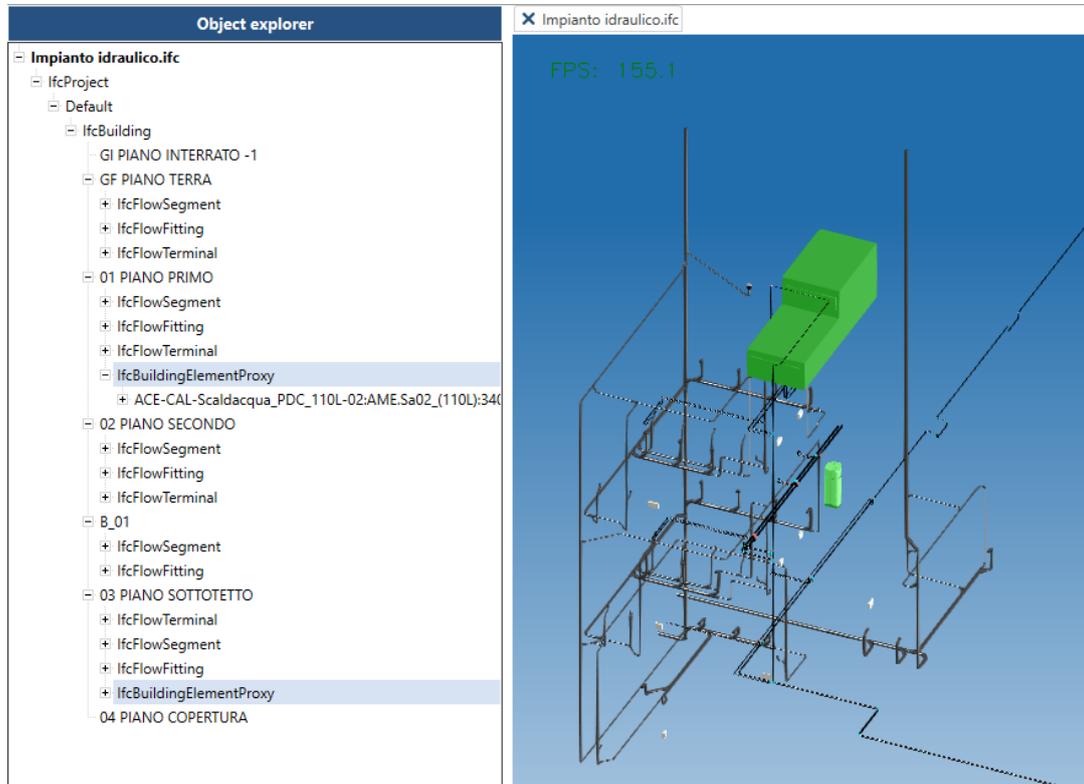


Figura 49 - Visualizzazione in OpenIFC dell'impianto idraulico con individuazione degli IfcBuildingElementProxy

Un esempio dettagliato è rappresentato dallo scaldacqua a pompa di calore, correttamente riconosciuto come si può mostrato dall'Figura 50. Questo è possibile anche verificarlo nel file XML associato (Figura 51):

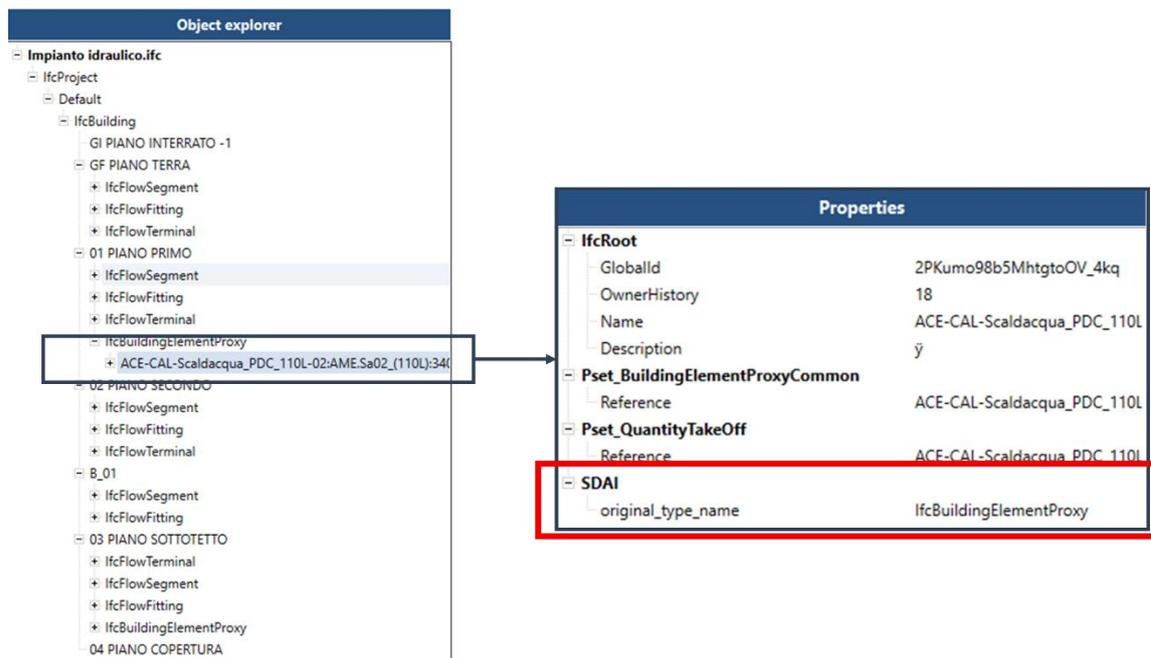


Figura 50 - Impianto idraulico in OpenIFC con focus sul generatore di ACS

```

IfcBuildingElementProxy id="2PKumo98b5MhtgtoOV_4kq" Name="ACE-CAL-Scaldacqua_PDC_110L-02:AME.Sa02_(110L):3404988" ObjectType="
<IfcPropertySet xlink:href="#10hTEXrPK_s$vHFq1AyU2K"/>
<IfcPropertySet xlink:href="#2_FC6KzED3dZr9Yn6qBBIP"/>
<IfcPropertySet xlink:href="#2Iz4ZMd69cYCUko6bXJvrE"/>
<IfcPropertySet xlink:href="#0Pd9v1JGcw4WPxwJoB1YcG"/>
<IfcPropertySet xlink:href="#3nXlPg_8pjY4rcP3uEw8J2"/>
<IfcPropertySet xlink:href="#0zlyP$SKZViSdw78vkqZkc"/>
<IfcBuildingElementProxyType xlink:href="#2syMPTdrb5yxzCq_Ht18P3"/>
<IfcPresentationLayerAssignment xlink:href="#M-EQPM-___-OTLN"/>
IfcBuildingElementProxy>
    
```

Figura 51 - Estratto XML del generatore di ACS

La fase di analisi ha pertanto messo in luce l'importanza di un controllo meticoloso delle impostazioni di esportazione, nonché della definizione chiara e precisa delle famiglie Revit e delle relative proprietà IFC. Un'esportazione ottimizzata si rende pertanto necessaria per garantire la corretta interpretazione degli oggetti e una successiva integrazione efficace con i dati energetici dell'APE all'interno del modello BIM.

REQUISITI DEL MODELLO

In questo secondo caso, è stata adottata una modellazione impiantistica più accurata e dettagliata, con l'obiettivo di validare i dati informativi nei file IFC arricchiti e verificarne la coerenza all'interno del visualizzatore IFC. A tal fine, i modelli sono stati creati ex novo, suddividendo i sistemi per disciplina: l'impianto di ventilazione e quello di climatizzazione sono stati modellati all'interno di un unico file

dedicato alla disciplina meccanica, mentre l'impianto di produzione di ACS è stato sviluppato separatamente in un file idraulico.

Tutti i modelli impiantistici fanno riferimento al medesimo file architettonico, inserito come collegamento esterno in Revit. A partire da questo riferimento, sono stati generati i livelli corrispondenti per garantire la coerenza altimetrica tra le varie discipline.

Nei paragrafi seguenti si descrive nel dettaglio la modellazione specifica dell'impianto idrico sanitario e meccanico.

MODELLAZIONE DELL'IMPIANTO IDRAULICO ACS

L'iter metodologico ha avuto inizio con la definizione del generatore, identificato come scaldabagno a pompa di calore aria-acqua, posizionato al primo piano, e dei terminali di utenza: WC, lavabo e lavabo per disabili. Tali elementi sono stati modellati utilizzando famiglie tridimensionali dotate di connettori MEP configurati correttamente.

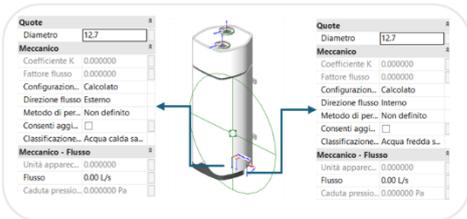
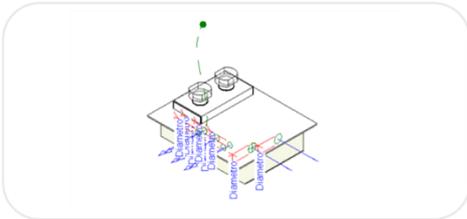
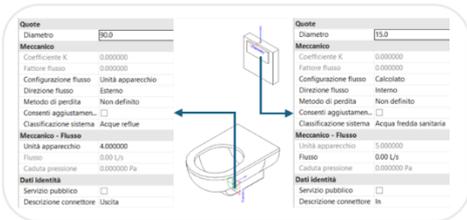
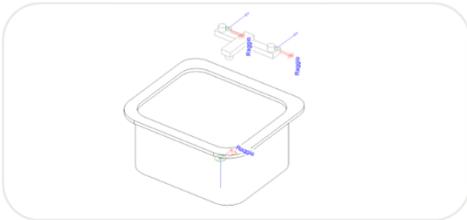
	Nome	Elemento	Descrizione
Generatore	Pompa di calore - W		Scaldabagno a pompa di calore aria-acqua
Accessori	Collettore		Collettore a cassetta con connettori per tubazioni di mandata e ritorno
Terminali	WC		Terminale WC opportunamente configurato con connettori per acqua fredda
	Lavabo		Terminale Lavabo opportunamente configurato con connettori per acqua fredda e calda

Figura 52 - Tabella riassuntiva degli elementi modellati

Il sistema idrico è stato concepito secondo un modello a collettore, che include le seguenti reti:

- Acqua calda sanitaria;
- Acqua fredda sanitaria;
- Scarichi delle acque reflue

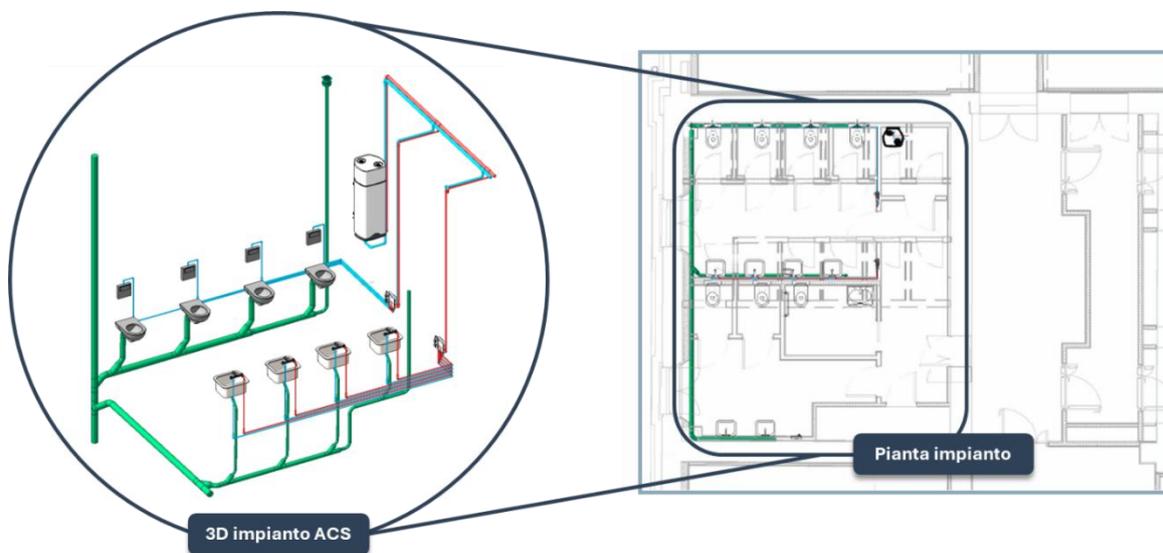


Figura 53 - Impianto produzione ACS

Ogni circuito è stato denominato secondo la nomenclatura stabilita dai Capitolati del Demanio, come riportato nella Figura 54.

	Nome	Elemento
AFS	SEG-TUB-AcquaFreddaSanitaria	
ACS	SEG-TUB-AcquaCaldaSanitaria	
ARF	SEG-TUB-Scarico	

Figura 54 - Tabella riassuntiva delle tubazioni

Successivamente si è proceduto alla modellazione dei circuiti mediante la funzione di creazione automatica dei sistemi in Revit, collegando i terminali al generatore e definendo i percorsi delle tubazioni.

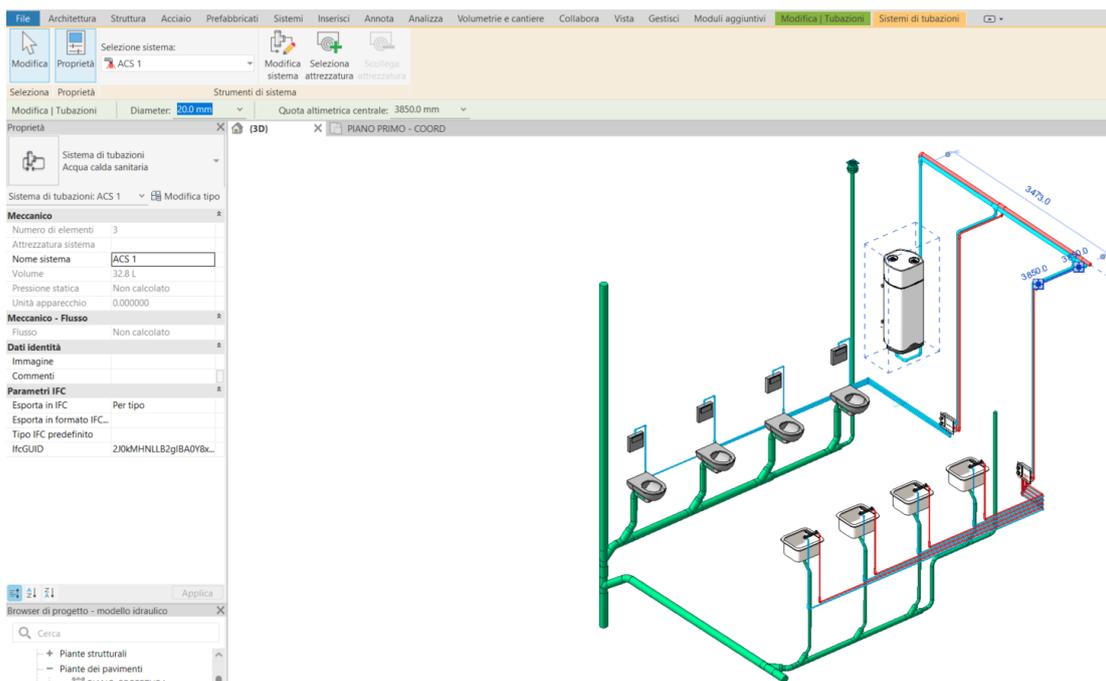


Figura 55 – Esempio di circuito acqua calda sanitaria

Verifica dell'esportazione IFC

Al termine del processo di modellazione, è stata effettuata una verifica dell'output IFC per ciascun elemento modellato. In caso di errori o assegnazioni generiche (ad esempio *IfcBuildingElementProxy*), si è intervenuti manualmente per correggere la classificazione.

Gli obiettivi erano i seguenti:

- Garantire la corretta configurazione delle impostazioni generali di export:

Categoria Revit	Nome classe IFC	Tipo IFC
Accessori per condotti	IfcBuildingElementProxy	
Accessori per tubazioni	IfcValveType	
Allineamenti	IfcBuildingElementProxy	
Annotazioni generiche	Non esportato	
Aperture analitiche	Non esportato	
Apparecchi elettrici	IfcElectricalTerminal	
<Linee nascoste>	IfcBuildingElementProxy	
Apparecchi idraulici	IfcFlowTerminal	
<Linee nascoste>	IfcFlowTerminal	
Clearance Zones	IfcFlowTerminal	
lavabi	IfcFlowTerminal	
rubinetteria	IfcFlowTerminal	
sanitary Fixtures	IfcFlowTerminal	
Apparecchi per illuminazione	IfcLightFixtureType	
<Linee nascoste>	IfcLightFixtureType	
Sorgente d'illuminazione	IfcLightFixtureType	
Appoggi	IfcBuildingElementProxy	
<Linee nascoste>	IfcBuildingElementProxy	
Aree	IfcSpace	
Riempimento colore	IfcSpace	

Figura 56 – Impostazioni generali di esportazione IFC

- Evitare l'esportazione come *IfcBuildingElementProxy*
- Verificare il tipo di esportazione selezionato, effettuando i controlli necessari sulle opzioni specifiche per garantire la coerenza tra il modello Revit e il formato IFC risultante:

Nel dettaglio:

- Sono stati condotti dei test per verificare che elementi come terminali (ad esempio i WC) venissero esportati come *IfcFlowTerminal*.

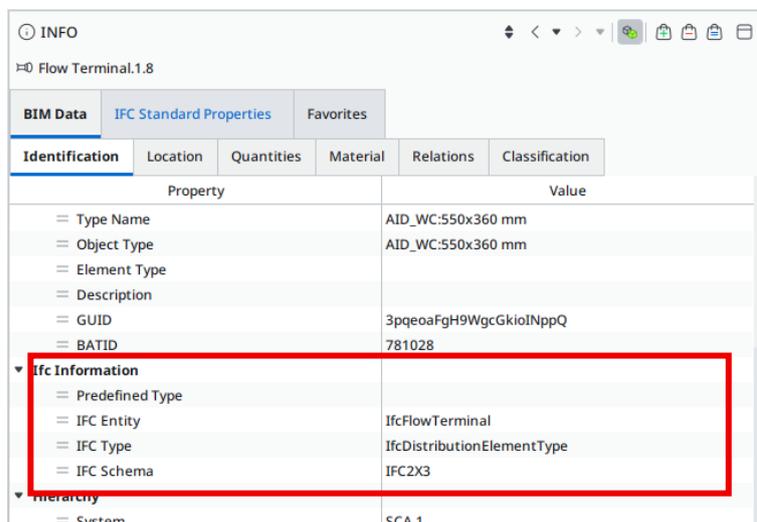


Figura 57 – Verifica della classificazione del WC come *IfcFlowTerminal*

In seguito, è stata assegnata la classificazione corretta *WCSEAT* per specificare il terminale, andando a definire il tipo IFC con il parametro “*Esporta in formato IFC*”:

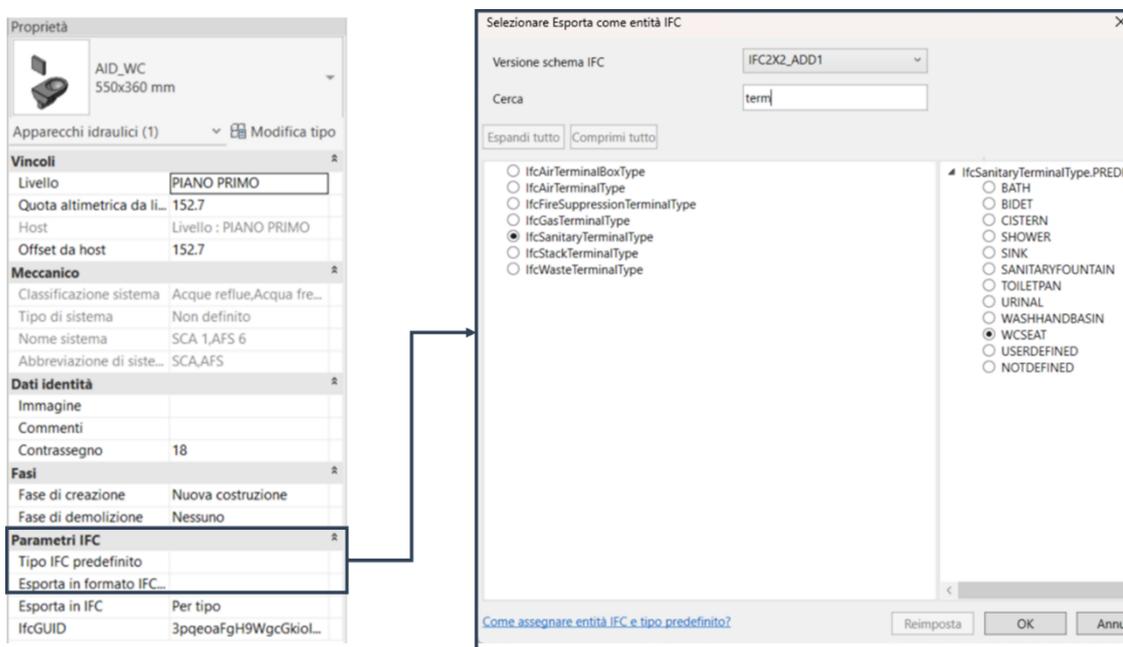


Figura 58 - Impostazioni per associare un tipo di Export IFC all'oggetto

Mantenendo le stesse impostazioni precedentemente definite, è stata avviata una nuova esportazione del modello:

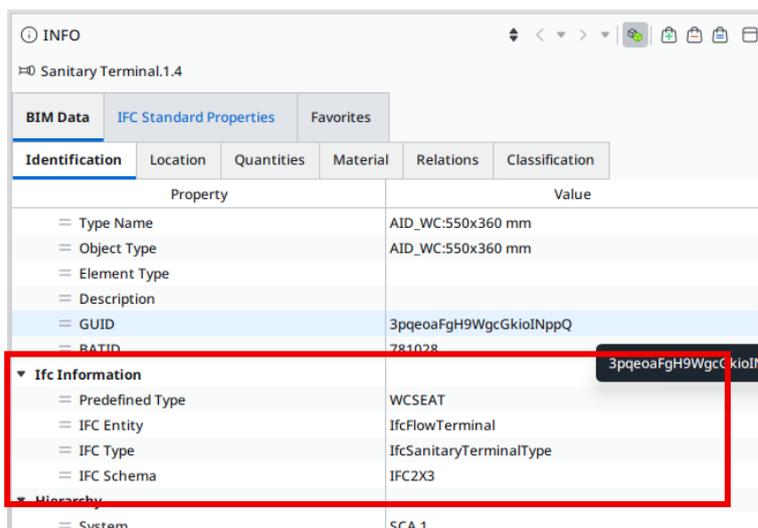


Figura 59 – Esportazione corretta del WC come IfcFlowTerminal: WCSEAT

- Nel caso specifico del generatore, il quale è stato inizialmente esportato come *IfcBuildingElementProxy*, si è proceduto con una mappatura puntuale verso *IfcSystem/IfcElementAssembly/IfcUnitaryEquipment*, in conformità con la tabella di corrispondenza derivata dal file XML APE e dal formato IFC. Questo è stato svolto con le stesse modalità del caso precedente si ottiene il seguente risultato (

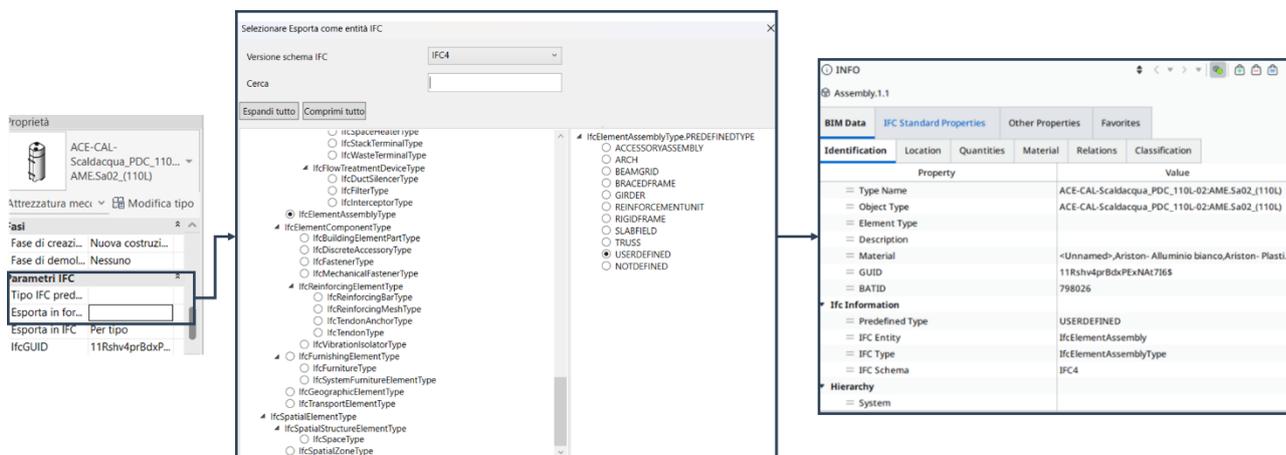


Figura 60 . Passaggi per ottenere l'export corretto caso generatore ACS

MODELLAZIONE IMPIANTO MECCANICO - VENTILAZIONE

Successivamente alla definizione dei livelli derivanti dal modello architettonico, si è proceduto alla modellazione dell'impianto di ventilazione relativo al secondo piano. Il processo di modellazione ha avuto inizio con l'inserimento dell'unità di trattamento aria (UTA), proseguendo successivamente con il tracciamento dei condotti principali e secondari. Ogni elemento è stato denominato in modo coerente e conforme agli standard di progetto. Si è prestata particolare attenzione alla personalizzazione e generazione delle famiglie Revit al fine di garantire un corretto export IFC.

I circuiti relativi al secondo piano sono stati delineati e identificati con le sigle "MANX" (mandata) e "RITX" (ritorno):

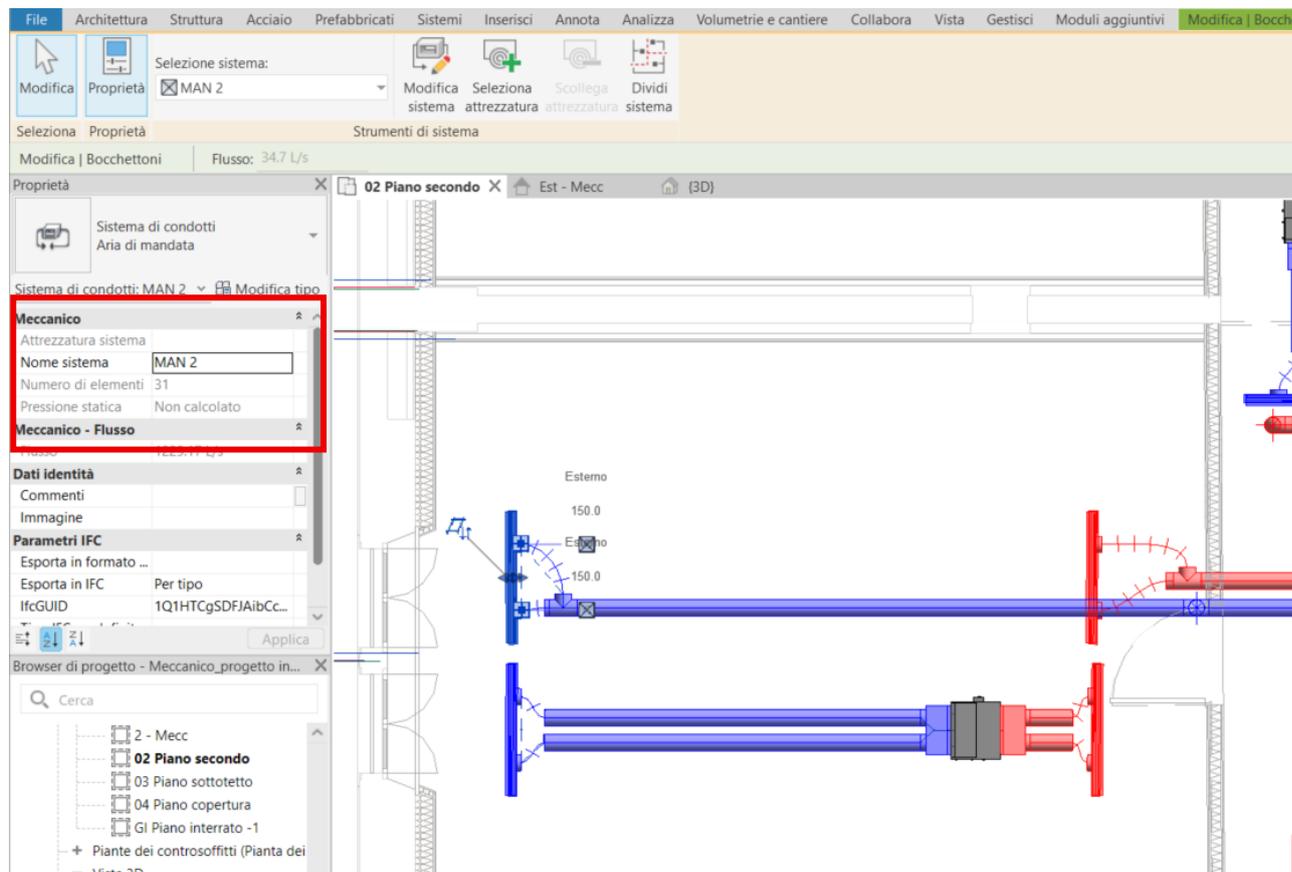


Figura 61 - Visualizzazione sistema di mandata "MAN2" dell'impianto di ventilazione

Di seguito, si riportano i circuiti che possono essere visualizzati nell'abaco dei sistemi di condotti:

<Abaco dei sistemi di condotti>			
A	B	C	D
Nome sistema	Famiglia e tipo	Numero di elemen	Classificazione sis
Meccanico Aria di scarico 1	Sistema di condotti: Aria di scarico	1	Aria di scarico
Sistema di condotti: Aria di scarico: 1			
MAN 2	Sistema di condotti: PTE_SC01_Aria, Mandata	31	Aria di mandata
MAN 8	Sistema di condotti: PTE_SC01_Aria, Mandata	1	Aria di mandata
MAN 3	Sistema di condotti: PTE_SC01_Aria, Mandata	12	Aria di mandata
MAN 9	Sistema di condotti: PTE_SC01_Aria, Mandata	1	Aria di mandata
MAN 7	Sistema di condotti: PTE_SC01_Aria, Mandata	1	Aria di mandata
MAN 11	Sistema di condotti: PTE_SC01_Aria, Mandata	1	Aria di mandata
MAN 4	Sistema di condotti: PTE_SC01_Aria, Mandata	3	Aria di mandata
MAN 6	Sistema di condotti: PTE_SC01_Aria, Mandata	1	Aria di mandata
MAN 5	Sistema di condotti: PTE_SC01_Aria, Mandata	1	Aria di mandata
MAN 12	Sistema di condotti: PTE_SC01_Aria, Mandata	1	Aria di mandata
Sistema di condotti: PTE_SC01_Aria, Mandata: 10			
RIT 18	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 6	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 7	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 10	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 11	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 9	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 13	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 21	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 3	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	14	Aria di ritorno
RIT 14	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 15	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 16	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 17	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 19	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 20	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 12	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 2	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	33	Aria di ritorno
RIT 5	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 8	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 1	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
RIT 4	Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa	1	Aria di ritorno
Sistema di condotti: PTE_SC02_Aria, Ripresa: 21			

Figura 62 - Abaco dei sistemi all'interno del modello di ventilazione

Questo approccio ha condotto all'acquisizione del modello dettagliato dell'impianto meccanico relativo al secondo piano, che include tutti i componenti principali, i collegamenti e i circuiti, definiti in modo coerente.

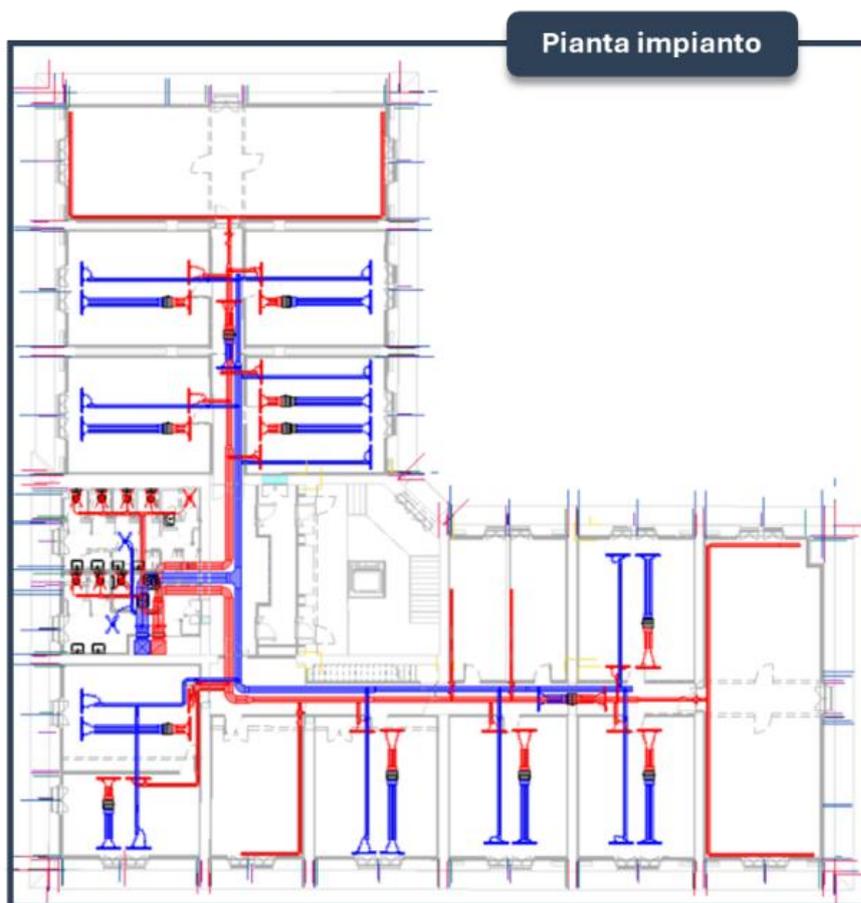


Figura 63 - Impianto di ventilazione pianta secondo piano

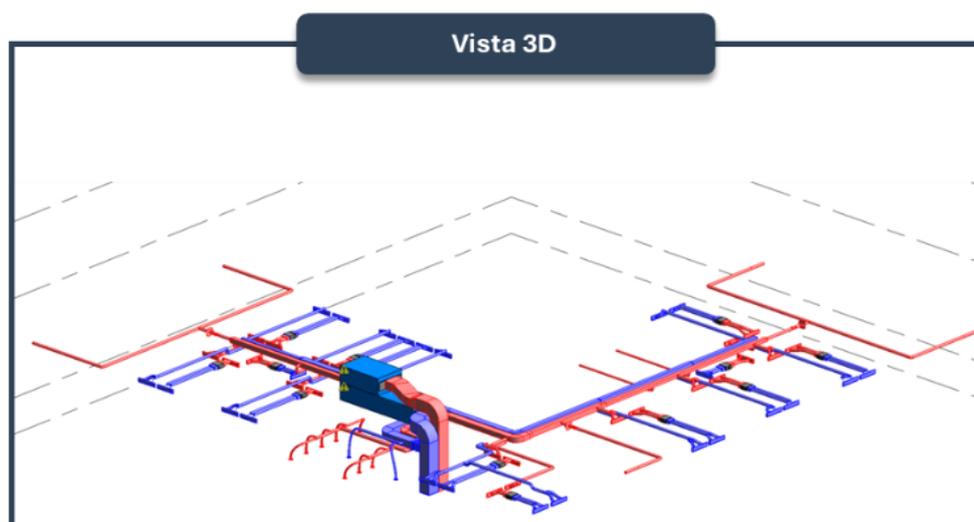


Figura 64 - Rappresentazione impianto di ventilazione vista 3D

Verifica dell'esportazione IFC

Il modello è stato esportato nel formato IFC 4, con le seguenti configurazioni:

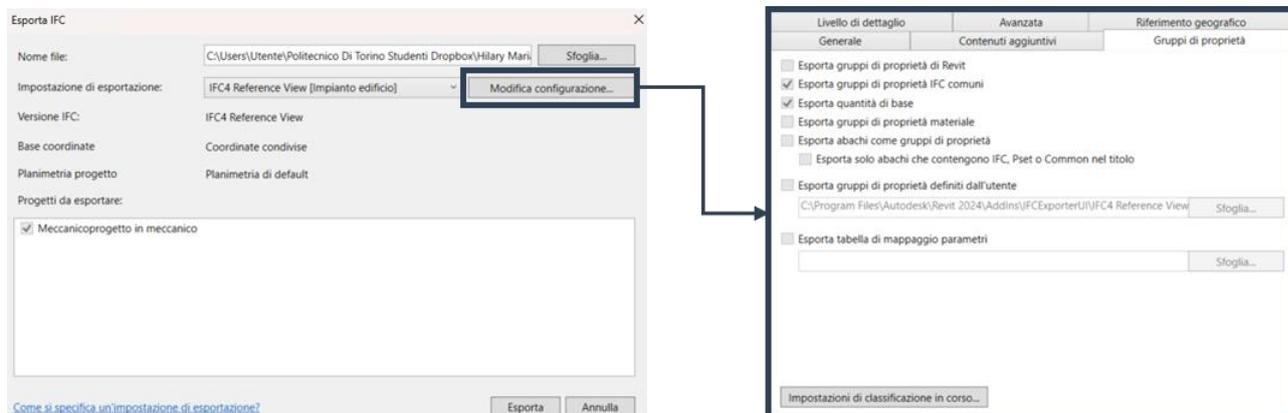


Figura 65 - Impostazione export IFC4

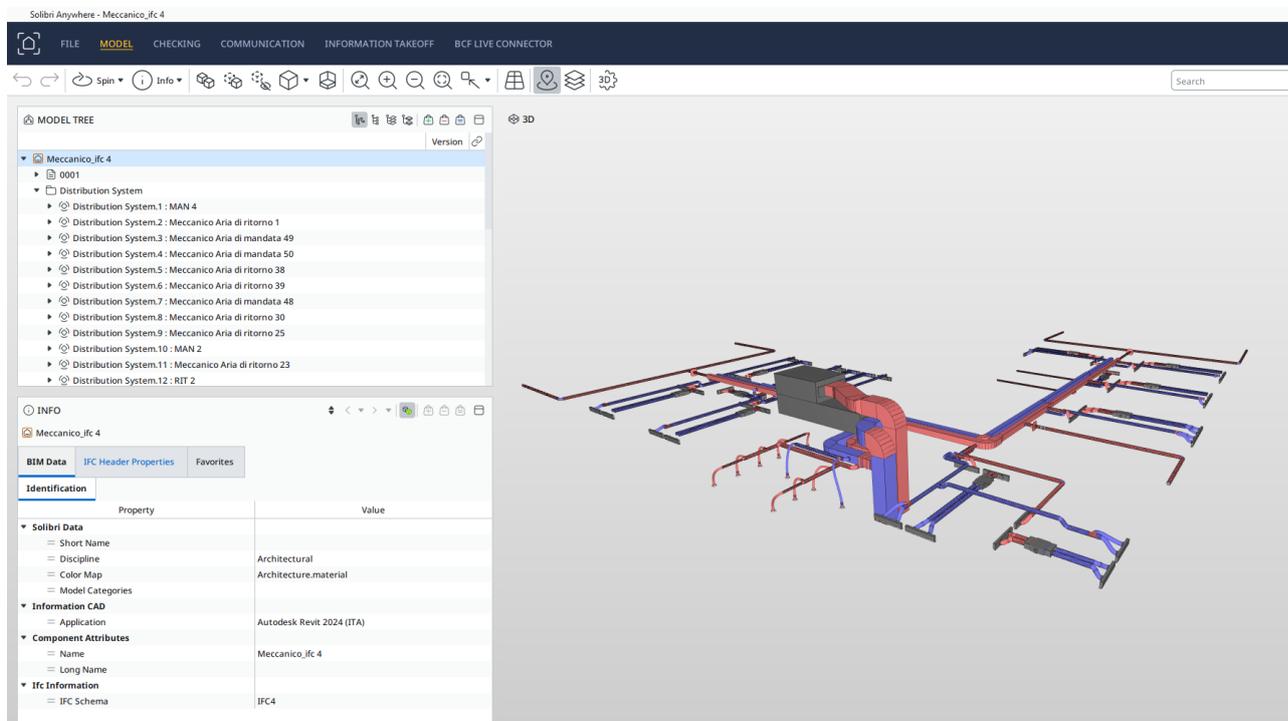


Figura 66 - Visualizzazione impianto di ventilazione in Solibri IFC4

L'analisi effettuata nei visualizzatori IFC ha messo in luce una significativa coerenza tra i formati XML e IFC 4. Tuttavia, l'analisi del file esportato rileva la presenza di alcuni elementi classificati come *IfcBuildingElementProxy*, sebbene in quantità inferiore rispetto al modello nello scenario 1. Il file XML (Figura 67) associato all'APE esteso presenta una corretta definizione dei circuiti.

```

6077 > <groups>
6078 > <IfcSystem id="3oI8PMAfD9U9oeRmMxusof" Name="RIT 2" ObjectType="Aria di ritorno">...
8737 > </IfcSystem>
8738 > <IfcSystem id="1Q1HTCgSDFJAibCcw9E5$P" Name="MAN 2" ObjectType="Aria di mandata">...
10662 > </IfcSystem>
10663 > <IfcSystem id="2GDvLt0fH8dwxQpDh49yTQ" Name="Meccanico Aria di ritorno 8" ObjectType="Aria di ritorno">...
10701 > </IfcSystem>
10702 > <IfcSystem id="2GDvLt0fH8dwxQpDh49yTL" Name="Meccanico Aria di ritorno 7" ObjectType="Aria di ritorno">...
10740 > </IfcSystem>
10741 > <IfcSystem id="1Q1HTCgSDFJAibCcw9E6go" Name="Meccanico Aria di ritorno 1" ObjectType="Aria di ritorno">...
10769 > </IfcSystem>
10770 > <IfcSystem id="1MshuC$sz3J8SqI2aHsMsC" Name="MAN 4" ObjectType="Aria di mandata">...
10825 > </IfcSystem>
10826 > <IfcSystem id="32ACx57ETCvQ$3TpDbCzr_" Name="Meccanico Aria di mandata 2" ObjectType="Aria di mandata">...
10845 > </IfcSystem>
10846 > <IfcSystem id="2GDvLt0fH8dwxQpDh49yrB" Name="Meccanico Aria di ritorno 5" ObjectType="Aria di ritorno">...
10884 > </IfcSystem>
10885 > <IfcSystem id="2GDvLt0fH8dwxQpDh49yA7" Name="Meccanico Aria di ritorno 6" ObjectType="Aria di ritorno">...
    
```

Figura 67 - Stralcio XML dell'IFC dell'impianto esportato

Un'analisi approfondita condotta su un sistema ha consentito di identificare e correggere alcuni elementi che non erano stati adeguatamente classificati. Tali aggiornamenti sono stati implementati manualmente, utilizzando la tabella di mappatura IFC-XML precedentemente sviluppata.

```

6077 > <groups>
6078 > <IfcSystem id="3oI8PMAfD9U9oeRmMxusof" Name="RIT 2" ObjectType="Aria di ritorno">
6079 > <IfcFlowTerminal id="3rejTZljbCCAdTuNdgl1Q" Name="TER-ARI-ValvolaEstrazione-01:TER-ARI_DN150mm-03:931912" ObjectType="TER-ARI-Va
6085 > </IfcFlowTerminal>
6086 > <IfcFlowTerminal id="3rejTZljbCCAdTuNdgl1R" Name="TER-ARI-ValvolaEstrazione-01:TER-ARI_DN150mm-03:931913" ObjectType="TER-ARI-Va
6092 > </IfcFlowTerminal>
6093 > <IfcFlowTerminal id="3rejTZljbCCAdTuNdgl10" Name="TER-ARI-ValvolaEstrazione-01:TER-ARI_DN150mm-03:931914" ObjectType="TER-ARI-Va
6099 > </IfcFlowTerminal>
6100 > <IfcFlowSegment id="31BNTMc9j6KxJUrnKElRuv" Name="Condotto rettangolare:Condotto rettangolare SEG-CON-VentilazionePAL-01:934669"
6108 > </IfcFlowSegment>
6109 > <IfcFlowFitting id="3SDPDTUULEyge4IJP2ngGc" Name="M_Calotta di chiusura rettangolare:Standard:940493" ObjectType="M_Calotta di ch
6115 > </IfcFlowFitting>
6116 > <IfcBuildingElementProxy id="39VQugqtr1KPElPc05dKjy" Name="RAC-CON-SerrandaAntincendio_Rettangolare-01:RAC-CON_A1000-28:942573" O
6122 > </IfcBuildingElementProxy>
6123 > <IfcFlowSegment id="39VQugqtr1KPElPc05dKa5" Name="Condotto rettangolare:Condotto rettangolare SEG-CON-VentilazionePAL-01:942996"
6131 > </IfcFlowSegment>
6132 > <IfcFlowFitting id="39VQugqtr1KPElPc05dKaE" Name="M_Deviatore rettangolare:Standard:943007" ObjectType="M_Deviatore rettangolare
6138 > </IfcFlowFitting>
6139 > <IfcBuildingElementProxy id="39VQugqtr1KPElPc05dK9L" Name="CFL-RFL-SerrandaRegolazione_Rettangolare-02:CFL-RFL-01:944324" Object
6145 > </IfcBuildingElementProxy>
6146 > <IfcFlowSegment id="39VQugqtr1KPElPc05dKf1" Name="Condotto rettangolare:Condotto rettangolare SEG-CON-VentilazionePAL-01:944510"
6154 > </IfcFlowSegment>
6155 > <IfcFlowSegment id="39VQugqtr1KPElPc05dKCi" Name="Condotto rettangolare:Condotto rettangolare SEG-CON-VentilazionePAL-01:944573"
6163 > </IfcFlowSegment>
6164 > <IfcFlowSegment id="39VQugqtr1KPElPc05dK0" Name="Condotto circolare:Condotto circolare SEG-CON-VentilazionePAL-01:944593" Object
6172 > </IfcFlowSegment>
    
```

Figura 68 - Stralcio XML su un circuito "RIT2" del sistema di ventilazione

A titolo esemplificativo, si consideri il caso dei diffusori terminali dell'impianto di ventilazione, inizialmente esportato come *BuildingElementProxy* generico, che è stato correttamente riassegnato sulla base della mappatura, utilizzando l'identificazione presenti per gli emettitori d'aria.

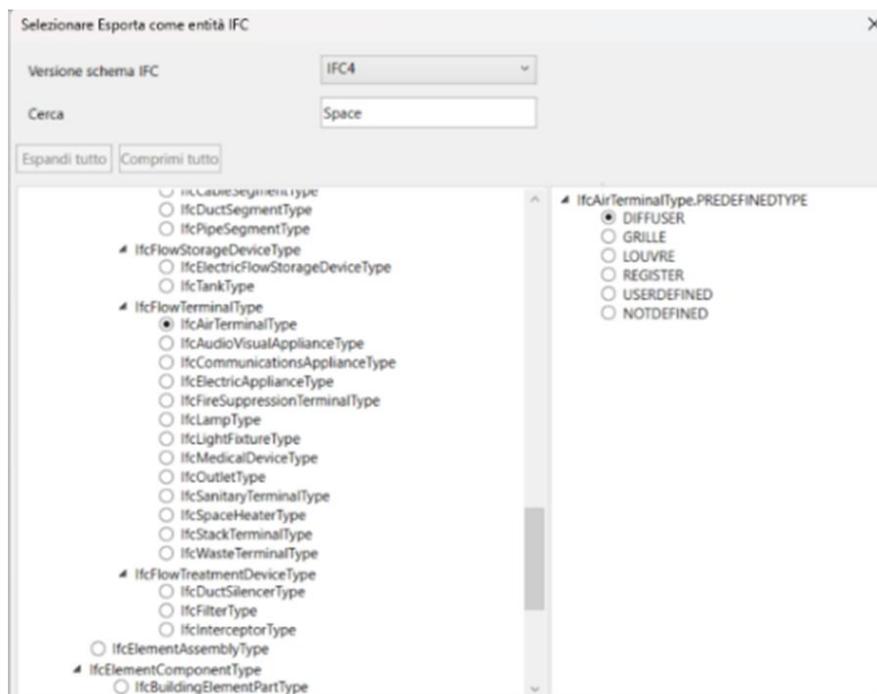


Figura 69 - Impostazione del tipo di export IFC sull'oggetto specifico

La medesima procedura è stata applicata anche alle valvole di estrazione e immissione, dove si è riscontrata la difficoltà di attribuire direttamente la classificazione *IfcDistributionControlElement*, non essendo selezionabile in Revit. In tali circostanze, è stato impiegato il tipo "USERDEFINED" e definito manualmente il parametro di esportazione.

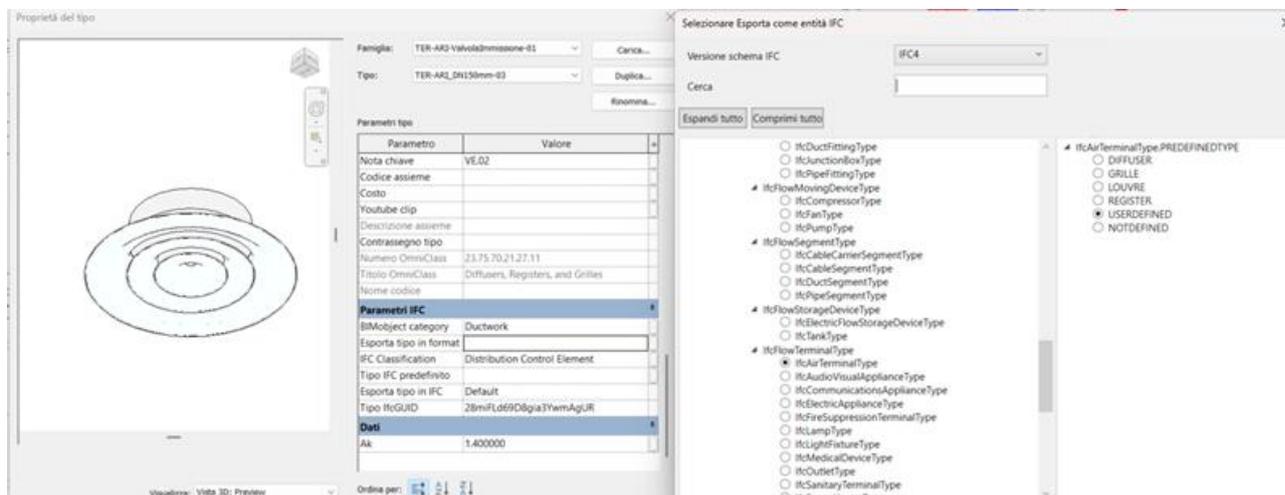


Figura 70 - Impostazione "Tipo di IFC" per l'export corretto dell'oggetto specifico valvola di estrazione aria

Per quanto concerne l'elemento UTA, sulla base della mappatura stabilita, si è stato possibile attribuire in modo adeguato la categoria *IfcUnitaryEquipmentTypeEnum*, che incarna componenti complessi inseriti in un sistema meccanico. La famiglia Revit corrispondente è stata modificata, impostando come tipo *UserDefined* e inserendo la voce "UTA" nel campo *ElementType*.

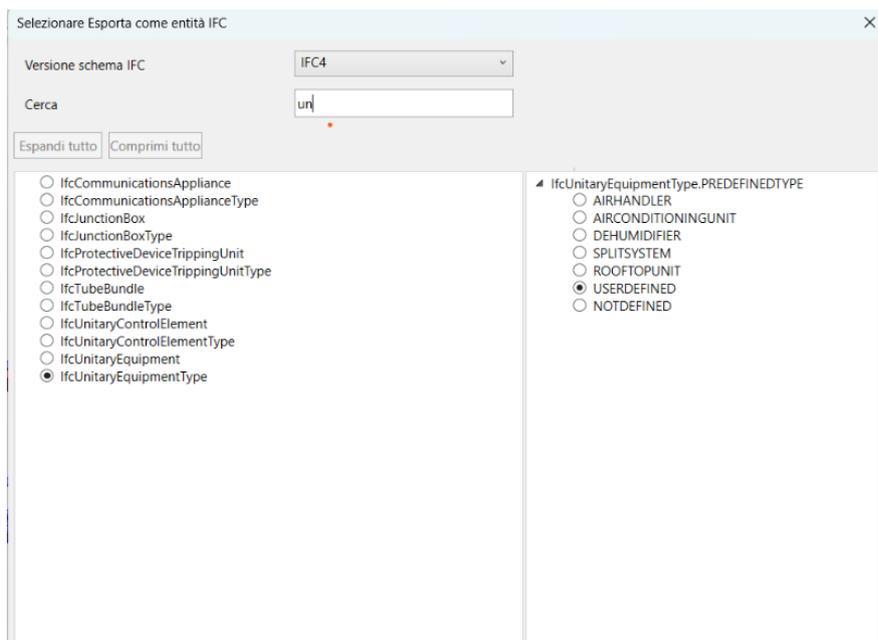


Figura 71 - Configurazione export tipo IFC dell'elemento UTA

MODELLAZIONE IMPIANTO MECCANICO - CLIMATIZZAZIONE

In parallelo alla modellazione dell'impianto di ventilazione, è stato sviluppato anche il sistema di climatizzazione. La sezione relativa alla modellazione del sistema di climatizzazione è stata progettata con l'obiettivo di valutare il comportamento del visualizzatore in presenza di più generatori all'interno dello stesso sistema. Per tale ragione, in questo modello, è stata presa la decisione di collocare i generatori direttamente all'interno del modello stesso, posizionando due pompe di calore. Si è pertanto proceduto all'utilizzo dello stesso file del modello di ventilazione per la replicazione dei livelli, impiegandoli come riferimento per la modellazione. Sono state installate due pompe di calore (PDC01 e PDC02), ciascuna dotata di caratteristiche distintive, come previsto dal progetto.

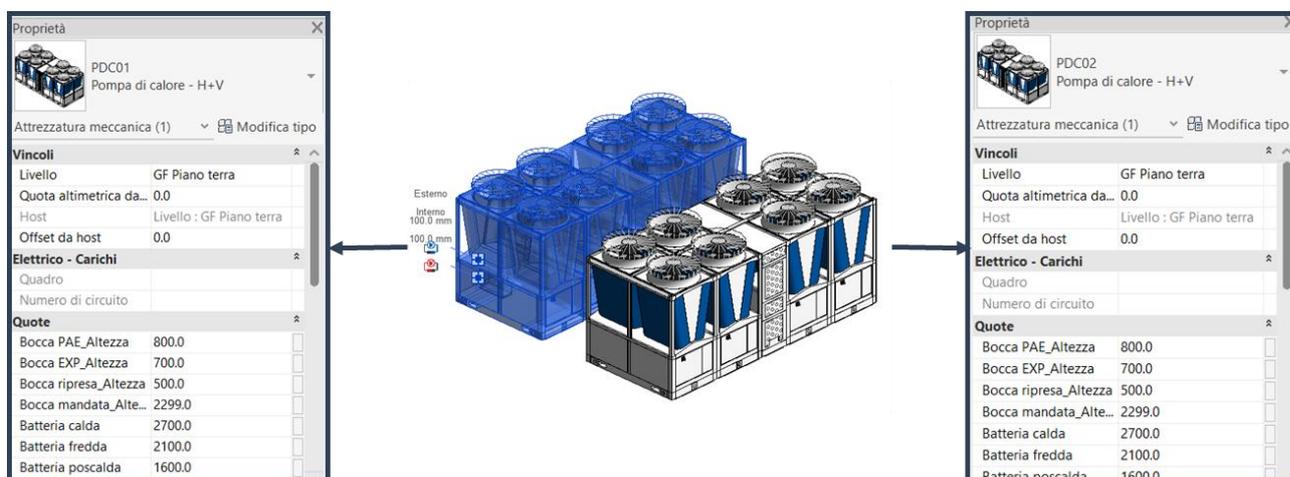


Figura 72 - Vista proprietà pompe di calore

Il tracciamento del sistema idronico ha previsto la definizione di diverse tipologie di tubazioni, inoltre, sono stati generati diversi sistemi idronici, ciascuno associato a un circuito di distribuzione specifico. La seguente tabella riassuntiva illustra la struttura e la configurazione del sistema:

<Abaco sistemi di tubazioni>				
A	B	C	D	E
Nome sistema	Famiglia	Famiglia e tipo	Numero di elem	Classificazione sistema
Mandata di sistema idronico				
MSI.CAT 2	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST40_Acqua calda alta	2	Mandata di sistema idronic
Ritorno di sistema idronico				
RSI.CBT 1	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST41_Acqua calda alta	1	Ritorno di sistema idronico
RSI.CBT 2	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST41_Acqua calda alta	1	Ritorno di sistema idronico
Mandata di sistema idronico				
MSI.CAT 5	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST42_Acqua calda alta	18	Mandata di sistema idronic
Ritorno di sistema idronico				
RSI.CAT 1	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST43_Acqua calda alta	18	Ritorno di sistema idronico
Mandata di sistema idronico				
MSI.PRO 1	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST44_Circuiti promiscu	14	Mandata di sistema idronic
Ritorno di sistema idronico				
RSI.PRO 1	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST45_Circuiti promiscu	14	Ritorno di sistema idronico
Mandata di sistema idronico				
MSI.REF 1	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST46_Circuiti promiscu	2	Mandata di sistema idronic
Ritorno di sistema idronico				
RSI.REF 1	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST47_Circuiti promiscu	1	Ritorno di sistema idronico
RSI.REF 2	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST47_Circuiti promiscu	1	Ritorno di sistema idronico
Mandata di sistema idronico				
MCP.CAL 1	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST50_Acqua calda (C.	2	Mandata di sistema idronic
Ritorno di sistema idronico				
RCP.CAL 1	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST51_Acqua calda (C.	3	Ritorno di sistema idronico
Mandata di sistema idronico				
MCP.PRO 1	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST52_Circuiti promiscu	2	Mandata di sistema idronic
Ritorno di sistema idronico				
RCP.PRO 1	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST53_Circuiti promiscu	3	Ritorno di sistema idronico
Altro				
GAS.MET 1	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST60_Circuiti promiscu	1	Altro
Altro				
GAS.GPL 1	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST61_Circuiti promiscu	1	Altro
Altro				
GMED 1	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST70_Acqua calda sec	1	Altro
Altro				
GMV 1	Sistema di tubazioni	Sistema di tubazioni: PTE_ST71_Acqua calda sec	1	Altro

Figura 73 - Abaco dei sistemi idronici nel modello

La modellazione ha permesso di definire un impianto completo di climatizzazione per il secondo piano dell'edificio, con i generatori principali (pompe di calore) collocati al piano terra e i collettori con i serbatoi all'interno della centrale termica. Le immagini che seguono illustrano un esempio del layout ottenuto nel modello tridimensionale:

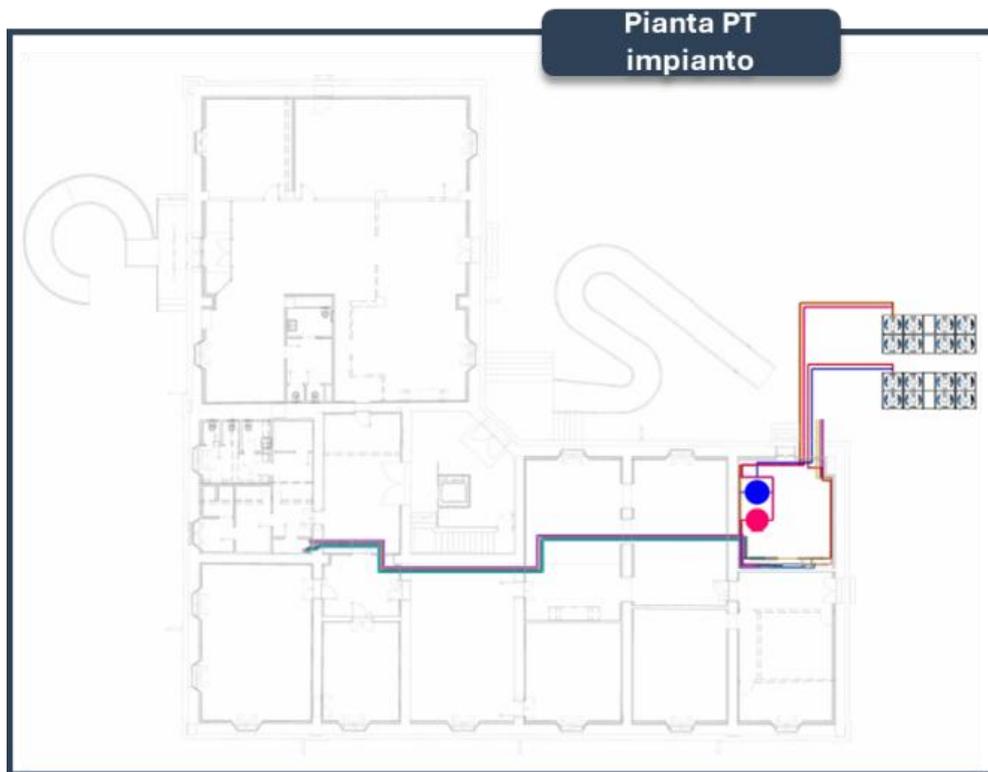


Figura 74 - Impianto di climatizzazione pianta piano terra



Figura 75 - Impianto di climatizzazione pianta secondo piano

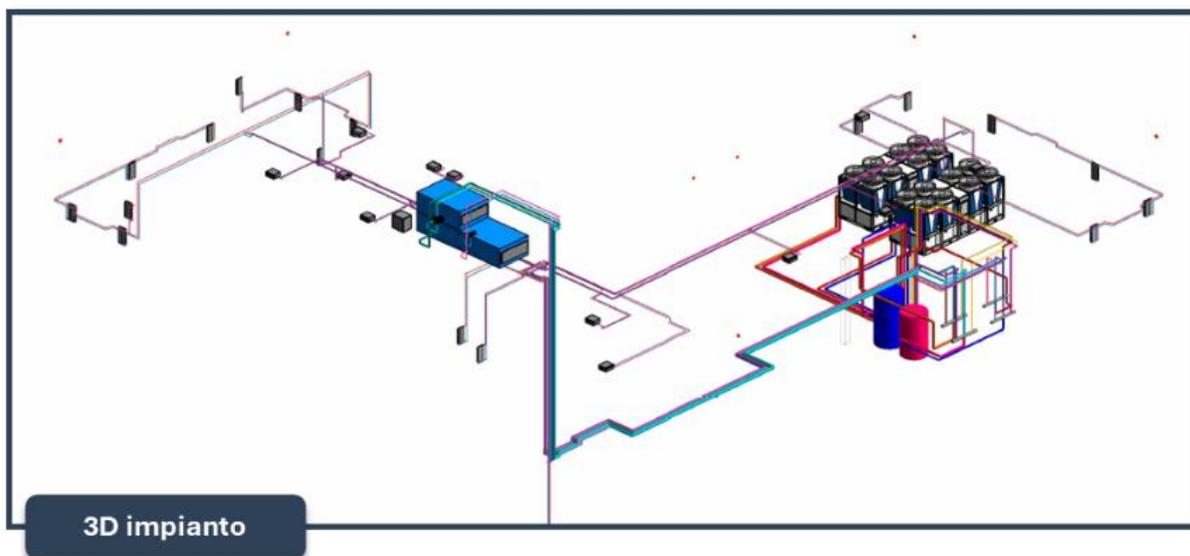


Figura 76 - Impianto di climatizzazione vista 3D

Verifica esportazione IFC

Al termine della fase di modellazione, il file è stato esportato in formato IFC4 per valutarne la coerenza semantica e geometrica nel visualizzatore dedicato. L'obiettivo del progetto è stato quello di verificare il corretto riconoscimento dei due generatori e delle rispettive connessioni all'interno dei sistemi idronici, nonché la corretta mappatura delle entità IFC assegnate agli elementi.

REQUISITI GENERALI

Oltre ai requisiti legati alla classificazione degli oggetti e all'ottimizzazione dei parametri di esportazione, l'integrazione tra file IFC e file XML APE ha evidenziato ulteriori condizioni necessarie per garantire un corretto allineamento semantico tra i due ambienti informativi. In particolare, è emerso che l'associazione tra gli oggetti impiantistici e la zona di riferimento rappresenta un elemento chiave per il successo dell'operazione di matching.

Durante la fase di validazione, è stato osservato che l'attribuzione corretta della zona all'interno del modello Revit è un prerequisito indispensabile per la corretta lettura e interpretazione del dato da parte del visualizzatore GEEDI. A titolo esemplificativo, nel caso dell'impianto per la produzione di ACS, è stata definita all'interno del modello una zona denominata "W2", corrispondente all'area dei servizi igienici, coerente con quanto specificato nel file XML (Figura 77). La medesima area è stata altresì delineata graficamente all'interno del disegno architettonico (Figura 78).

```

25002 <impianto>
25003   <descrizione> - W</descrizione>
25004   <servizio>
25005     <acs>
25006       <listaZone>
25007         <idZona>W2</idZona>
25008       </listaZone>
25009     <fabbisogno>
25010       <valoriMensili>...
25023     </valoriMensili>
25024     <valoreAnnuale>838.5876</valoreAnnuale>
25025   </fabbisogno>
25026 </acs>
25027 </servizio>
25028 <generazione>
25029   <listaGeneratori>
25030     <generatore>
25031       <datiGeneratore>
25032         <descrizione>Pompa di calore - W</descrizione>
25033         <potenzaNominale>3.7571</potenzaNominale>
25034         <combustibile>0</combustibile>
25035         <ubicazione>1</ubicazione>
25036         <fluidoTermovettore>0</fluidoTermovettore>
    
```

Figura 77 - Stralcio XML individuazione nome zona

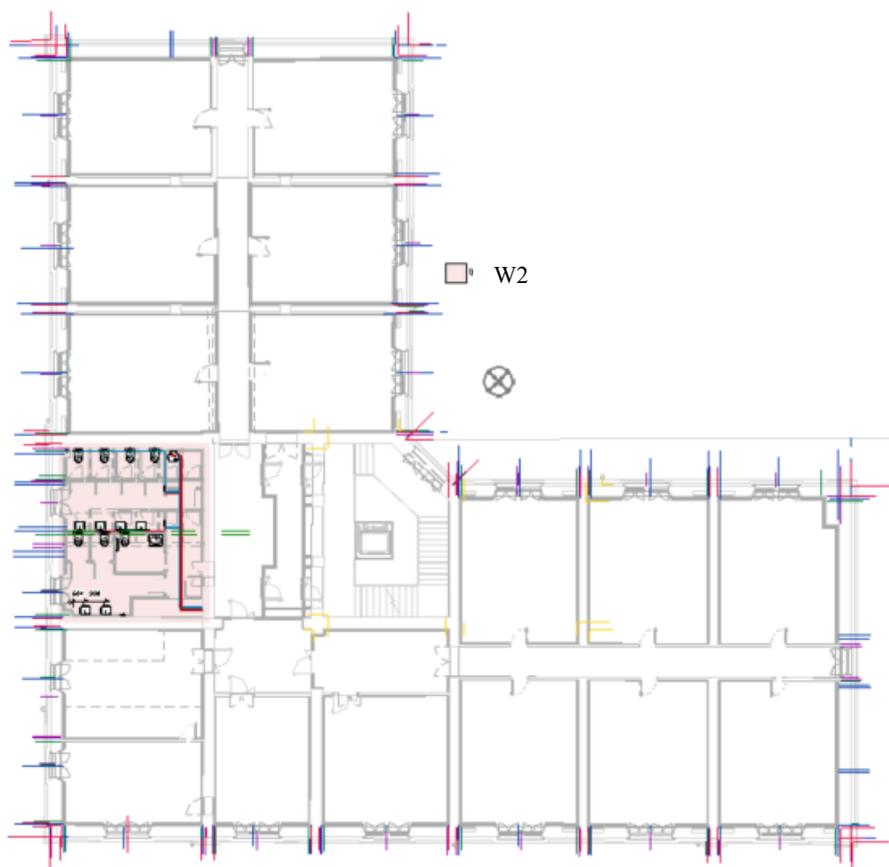


Figura 78 - Pianta con la zona di pertinenza V8

A seguito di tale operazione, il visualizzatore ha dimostrato la capacità di stabilire correttamente il collegamento tra la pompa di calore modellata nel file IFC e il generatore descritto nel file XML, confermando così la correttezza dell'approccio metodologico.

La medesima criticità è stata riscontrata anche negli altri modelli impiantistici, relativi alla climatizzazione e alla ventilazione meccanica. Inizialmente, il visualizzatore era in grado di identificare

una singola pompa di calore, senza operare alcuna distinzione tra le diverse configurazioni riportate nel file XML. Tuttavia, l'analisi del file APE ha rivelato la presenza di tre generatori distinti, ciascuno con una funzione specifica:

- Pompa di calore H+V / UTA: destinata al riscaldamento invernale e ventilazione

```
23597 <impianti>
23598 <impianto>
23599 <descrizione> - H+V</descrizione>
23600 > <servizio>...
23647 </servizio>
23648 <generazione>
23649 <listaGeneratori>
23650 <generatore>
23651 <datiGeneratore>
23652 <descrizione>Pompa di calore - H+V</descrizione>
23653 <potenzaNominale>444.5</potenzaNominale>
23654 <combustibile>0</combustibile>
23655 <ubicazione>1</ubicazione>
23656 <fluidoTermovettore>0</fluidoTermovettore>
23657 > <risultati>...
23752 </risultati>
23753 </datiGeneratore>
23754 > <pompaDiCalore>...
23787 </pompaDiCalore>
23788 </generatore>
23789 <generatore>
23790 <datiGeneratore>
23791 <descrizione>Pompa di calore - H+V</descrizione>
23792 <potenzaNominale>204.0000</potenzaNominale>
23793 <combustibile>0</combustibile>
23794 <ubicazione>1</ubicazione>
23795 <fluidoTermovettore>0</fluidoTermovettore>
23796 > <risultati>
```

Figura 79 - XML con pompa di calore H+V

- Pompa di calore C: per la climatizzazione estiva

```

24389 <impianto>
24390 <descrizione> - C</descrizione>
24391 <servizio>
24392 <raffrescamento>
24393 > <listaZone>...
24395 </listaZone>
24396 > <fabbisogno>...
24412 </fabbisogno>
24413 </raffrescamento>
24414 </servizio>
24415 <generazione>
24416 <listaGeneratori>
24417 <generatore>
24418 <datiGeneratore>
24419 <descrizione>Pompa di calore - C</descrizione>
24420 <potenzaNominale>315</potenzaNominale>
24421 <combustibile>0</combustibile>
24422 <ubicazione>1</ubicazione>
24423 <fluidoTermovettore>0</fluidoTermovettore>
24424 > <risultati>...
24518 </risultati>
24519 </datiGeneratore>

```

Figura 80 - XML pompa di calore C

- Pompa di calore W: dedicata alla produzione di acqua calda sanitaria

```

25027 </servizio>
25028 <generazione>
25029 <listaGeneratori>
25030 <generatore>
25031 <datiGeneratore>
25032 <descrizione>Pompa di calore - W</descrizione>
25033 <potenzaNominale>2.7571</potenzaNominale>
25034 <combustibile>0</combustibile>
25035 <ubicazione>1</ubicazione>
25036 <fluidoTermovettore>0</fluidoTermovettore>
25037 > <risultati>...
25132 </risultati>
25133 </datiGeneratore>
25134 > <pompaDiCalore>...
25167 </pompaDiCalore>
25168 </generatore>

```

Figura 81 - XML con pompa di calore W

Ognuna di esse è caratterizzata da parametri specifici quali potenza nominale, efficienza stagionale e vettore energetico.

Per migliorare il processo di matching, è stato effettuato un ulteriore intervento all'interno del modello Revit, modificando la denominazione della famiglia associata alla pompa di calore, rendendola coerente con la descrizione riportata nel file XML.

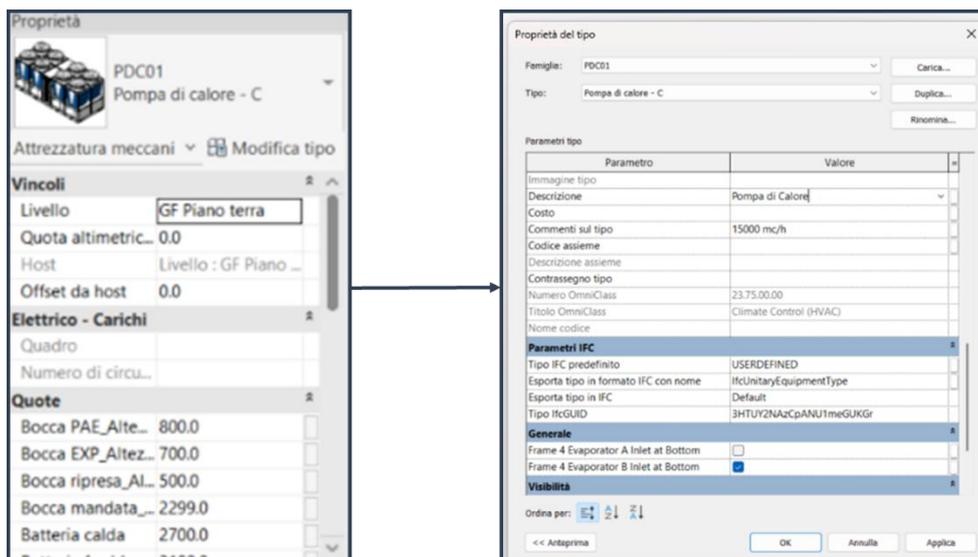


Figura 82 - Proprietà pompa di calore C

Questo permetterà al visualizzatore di eseguire un'analisi combinata basata sia sulla classificazione IFC (es. *IfcElementEquipment* o *IfcElementAssembly*) sia sulla denominazione univoca.

Nonostante ciò, si è potuto constatare che tali accorgimenti non risultavano ancora sufficienti. Il matching corretto tra componente IFC e generatore XML avveniva solo nel momento in cui veniva definita con precisione anche la zona di appartenenza dell'elemento all'interno del modello. Senza questa informazione, il sistema non riusciva a discriminare correttamente tra i diversi oggetti, nonostante le altre corrispondenze semantiche fossero corrette.

Un ulteriore requisito emerso riguarda l'associazione dell'elemento impiantistico al sistema di distribuzione corretto. In particolare, nel caso dell'impianto di climatizzazione, si è osservato che il riscaldamento invernale viene generalmente associato in modo automatico al relativo sistema, mentre per la climatizzazione estiva è necessario esplicitare l'associazione al sistema *IfcDistributionSystem*, specificandolo come *AirConditioning* in fase di esportazione (Figura 83). Tale configurazione garantisce che l'oggetto venga correttamente riconosciuto e interpretato come appartenente al circuito di raffrescamento, evitando ambiguità nella lettura delle informazioni.

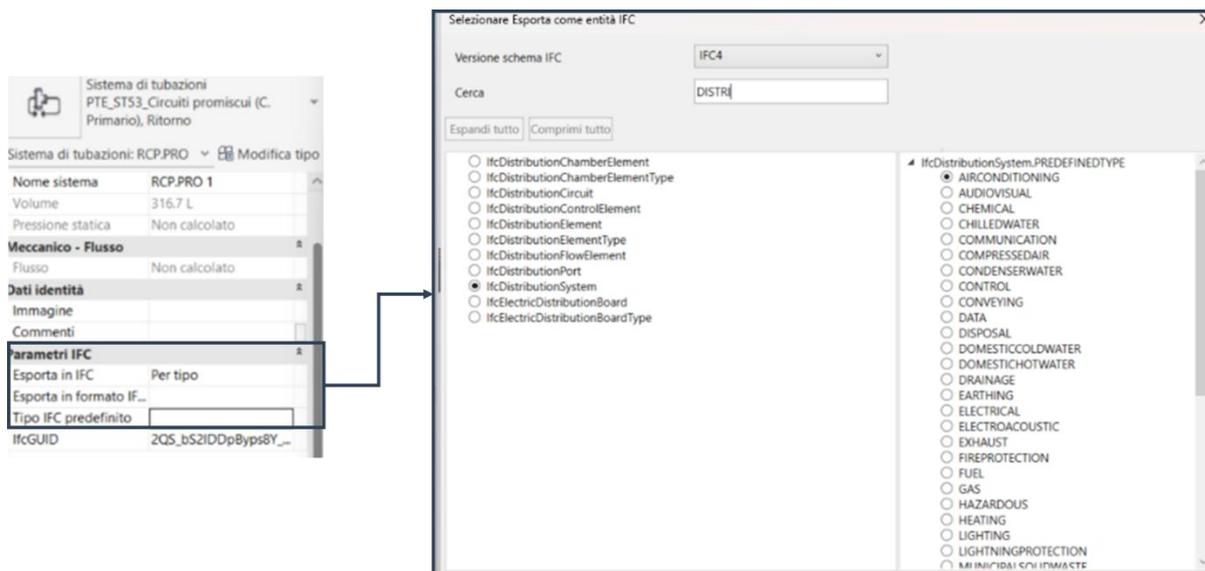


Figura 83 - Impostazione esportazione sistema

5.1.2 Validazione XML

INTEGRAZIONE MANUALE

In questa sezione viene presentato un esperimento metodologico volto a integrare manualmente i dati energetici, come riportato nell'APE, all'interno di un modello BIM sviluppato con il software Autodesk Revit. L'obiettivo del progetto è stato testare la possibilità di associare direttamente, già in fase di modellazione, le informazioni contenute nel file XML esteso dell'APE agli oggetti del modello, al fine di ottenere un file IFC già "arricchito" con informazioni energetiche utili alla successiva visualizzazione e analisi.

L'analisi è stata condotta su due impianti specifici:

- L'impianto di produzione di acqua calda sanitaria (ACS);
- L'impianto di ventilazione meccanica.

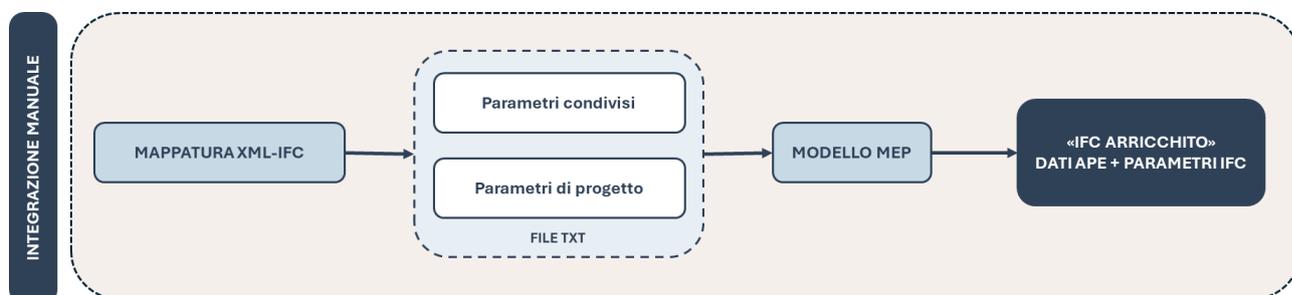


Figura 84 - Schema integrazione manuale

L'approccio metodologico adottato ha avuto l'obiettivo di simulare un flusso informativo coerente e strutturato, in conformità con i principi dell'openBIM, verificando la possibilità di mappare e trasferire

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica correttamente i parametri energetici dal formato XML al formato IFC, attraverso operazioni condotte direttamente nell'ambiente di modellazione.

Per ciascuno dei due impianti è stato seguito un processo articolato in tre passaggi fondamentali:

- Identificazione delle entità IFC di riferimento: per ciascun parametro dell'APE è stata individuata l'entità IFC più appropriata (es. IfcSystem, IfcBuilding, ecc.);
- Configurazione dei parametri in Revit, distinguendo tra parametri condivisi (definiti a livello di famiglia) e parametri di progetto (associati alle categorie);
- Esportazione del modello in formato IFC e verifica della corretta trascrizione dei dati attraverso l'uso di visualizzatori openBIM come Solibri.

CASO 1: INTEGRAZIONE DEI DATI DELL'IMPIANTO ACS

Il primo test ha riguardato l'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria. A seguito dell'analisi della struttura XML estesa dell'APE, sono stati identificati i parametri significativi da integrare, riportati nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, che illustra le corrispondenze tra XML, entità IFC, Property Set e tipo di dato (

ALLEGATO A).

XML APE_datiCalcolo		MAPPATURA IFC					
n.	parametri ape2015	Entities	Property Set	Attribute	Data Type	U.M.	Descrizione

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica

120	documento.ape2015.datImpianti.produzione ACS.impianto.tipoImpianto	IfcSystem/IfcElement Assembly	ImpiantoDati Idrotermico	TipoProduzioneACS	IfcText	N.A.	PRODUZIONE ACS: Tipologia impianto
121	documento.ape2015.datImpianti.produzione ACS.impianto.descrizioneImpianto	IfcSystem/IfcElement Assembly	ImpiantoDati Idrotermico	DescrizioneImpiantoProduzioneACS	IfcText	N.A.	PRODUZIONE ACS: Descrizione impianto produzione ACS
122	documento.ape2015.datImpianti.produzione ACS.impianto.annoInstallazione	IfcSystem/IfcElement Assembly	ImpiantoDati Qualitativi	AnnoInstallazione	IfcReal	N.A.	Anno di installazione generatore di energia
123	documento.ape2015.datImpianti.produzione ACS.impianto.codiceCatastoRegionaleImpiantiTermici	IfcSystem/IfcElement Assembly	ImpiantoDati Qualitativi	CodiceCatastoRegionaleImpiantiTermici	IfcText	N.A.	Codice Catasto Regionale Impianti Termici
124	documento.ape2015.datImpianti.produzione ACS.impianto.vettoriEnergeticiUtilizzati.vettore	IfcSystem/IfcElement Assembly	ImpiantoDati Qualitativi	FonteEnergia	IfcText	N.A.	Fonte di energia utilizzata dall'impianto
125	documento.ape2015.datImpianti.produzione ACS.impianto.potenzaNominale	IfcSystem/IfcElement Assembly	ImpiantoDati Qualitativi	Potenza Nominale	IfcReal	kW	Potenza Nominale dell'impianto
126	documento.ape2015.datImpianti.produzione ACS.impiantoSimulato	IfcSystem/IfcElement Assembly	ImpiantoDati Qualitativi	DescrizioneImpiantoSimulato	IfcText	N.A.	Tipologia Impianto Simulato
127	documento.ape2015.datImpianti.produzione ACS.energia	IfcBuilding	FabbricatiEnergetici	EfficienzaGlobaleStagionaleACS	IfcReal	N.A.	ACS: efficienza globale stagionale
128	documento.ape2015.datImpianti.produzione ACS.prestazione.epren	IfcBuilding	FabbricatiEnergetici	EPWren	IfcReal	kWh/m ²	ACS: Indice di prestazione rinnovabile
129	documento.ape2015.datImpianti.produzione ACS.prestazione.epnren	IfcBuilding	FabbricatiEnergetici	EPWnren	IfcReal	kWh/m ²	ACS: Indice di prestazione non rinnovabile

Tabella 4 - Mappatura XML-IFC sull'impianto ACS

Successivamente, sono stati analizzati i parametri potenziali da inserire e sono state impostate le operazioni necessarie per eseguire il match tra i dati contenuti nell'Attestato di Prestazione Energetica (APE) e gli oggetti modellati all'interno dell'ambiente BIM di Revit. Al fine di realizzare tale integrazione, si è reso necessario intraprendere una serie di operazioni manuali preliminari. In particolare, per l'aggiunta di nuovi parametri da associare agli elementi del modello, è stata adottata una procedura basata sull'uso di file di testo (.txt), nei quali vengono definiti i parametri condivisi. Tali file sono successivamente connessi al progetto BIM tramite l'interfaccia di Revit, permettendo la corretta configurazione sia dei parametri di progetto che dei parametri condivisi.

- **Parametri condivisi:** definiti a livello di famiglia tramite “*Gestisci*” → “*Parametri condivisi*”, generando un nuovo gruppo denominato *ImpiantoDatiQualitativi*.

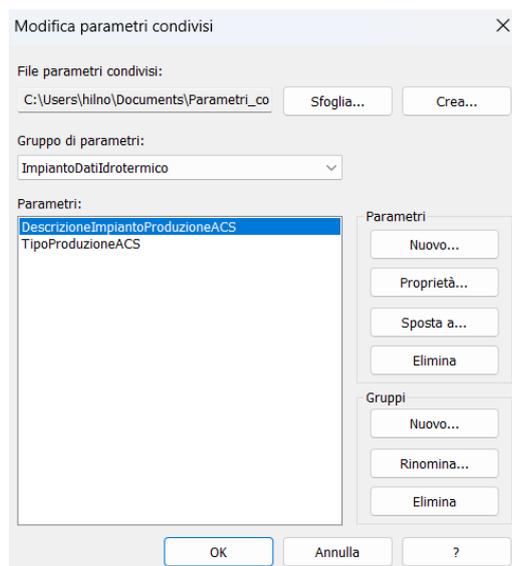


Figura 85 - Generazione parametri condivisi

- **Parametri di progetto:** aggiunti al modello tramite “Gestisci” → “Parametri progetto”, selezionando i parametri condivisi e assegnandoli alla categoria “Meccanico”.

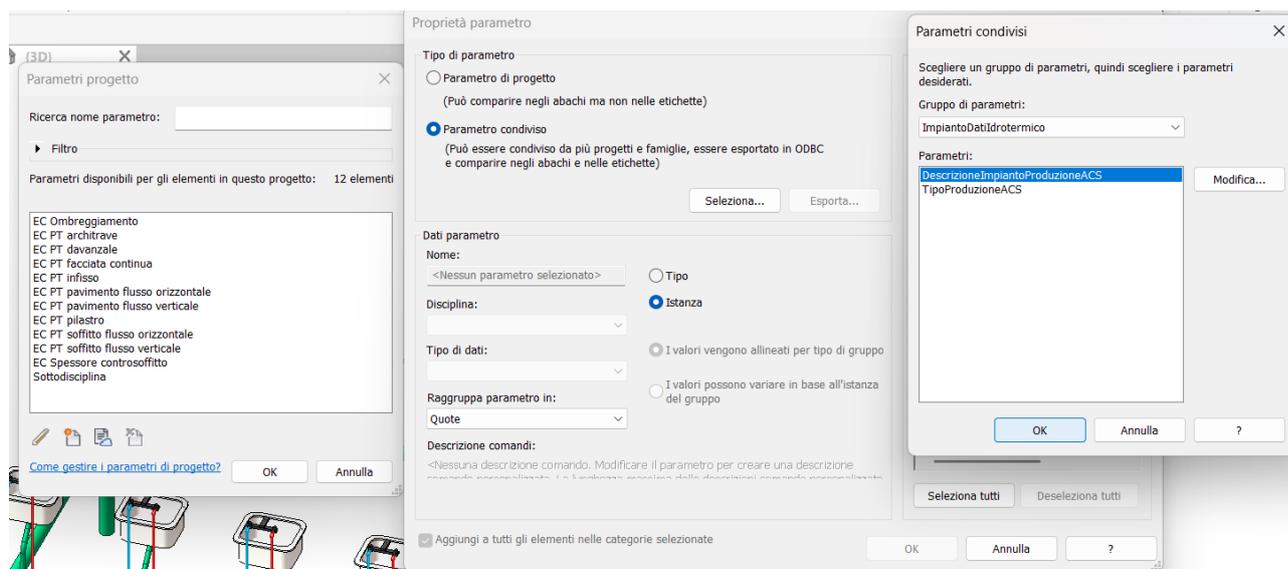


Figura 86 - Impostazioni per inserire i parametri di progetto

Una volta configurati i parametri, questi sono stati inseriti all'interno delle famiglie Revit già modellate. Questo approccio ha consentito di integrare ogni componente relativa all'impianto di riscaldamento e acqua calda sanitaria con le informazioni energetiche derivanti dall'Attestato di Prestazione Energetica (APE).

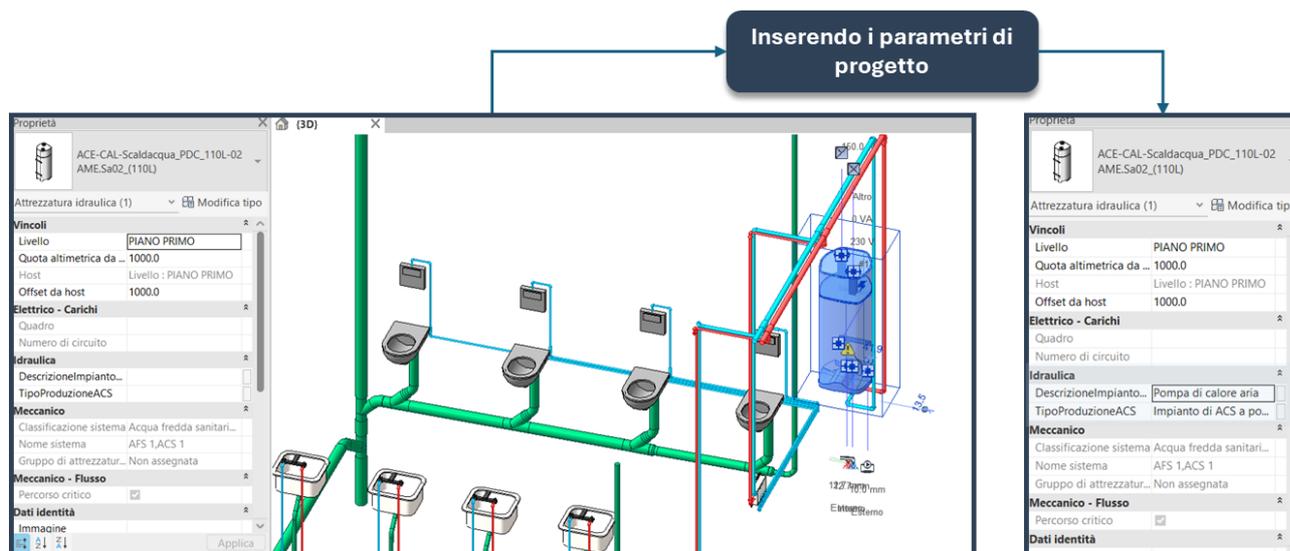


Figura 87 - Visualizzazione pre e post inserimento dei parametri di progetto

Infine, si è proceduto all'esportazione in formato IFC4. Il file risultante è stato aperto nel software Solibri, dove è stato possibile verificare che:

- I parametri risultassero correttamente esportati,
- Le informazioni energetiche fossero associate ai giusti oggetti,
- I dati fossero collocati nei **Property Set (Pset)** previsti.

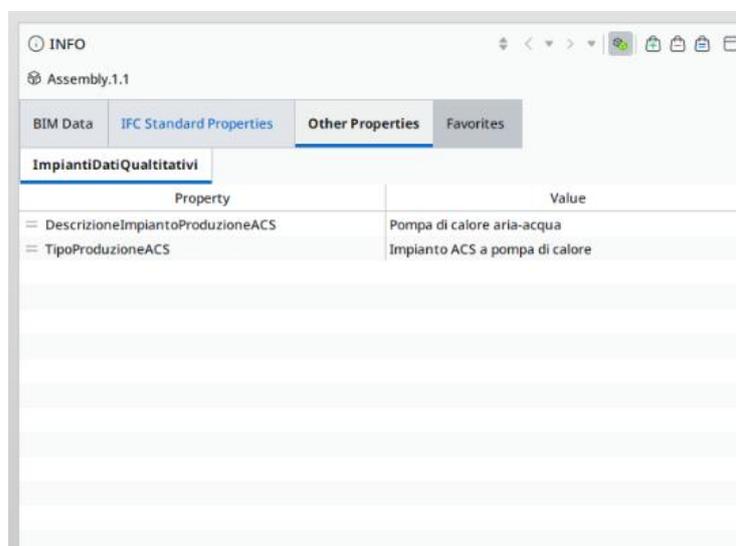


Figura 88 - Visualizzazione della corretta esportazione dei parametri Pset associati al generatore di ACS

CASO 2: INTEGRAZIONE DEI DATI DELL'IMPIANTO MECCANICO-VENTILAZIONE

Il secondo test ha replicato il medesimo procedimento per il sistema di ventilazione meccanica controllata. Anche in questo caso, la fase preliminare ha previsto l'analisi dei parametri energetici presenti nel file XML dell'APE esteso e la loro mappatura verso le entità IFC. La Tabella 5 fornisce una sintesi delle corrispondenze principali identificate.

XML APE_datiCalcolo		MAPPATURA IFC					
n.	parametri ape2015	Entities	Property Set	Attribute	Data Type	U.M.	Descrizione
145	documento.ape2015.datiImpianti.ventilazioneMeccanica.impianto.tipoImpianto	IfcSystem/IfcElementAssembly	ImpiantoDatiQualitativi	Tipologia	IfcText	N.A.	Tipologia dell'impianto
146	documento.ape2015.datiImpianti.ventilazioneMeccanica.impianto.descrizioneImpianto	IfcSystem/IfcElementAssembly	ImpiantoDatiQualitativi	DescrizioneImpianto	IfcText	N.A.	Descrizione generatore di energia
147	documento.ape2015.datiImpianti.ventilazioneMeccanica.impianto.annoInstallazione	IfcSystem/IfcElementAssembly	ImpiantoDatiQualitativi	AnnoInstallazione	IfcReal	N.A.	Anno di installazione generatore di energia
148	documento.ape2015.datiImpianti.ventilazioneMeccanica.impianto.codiceCatastoRegionaleImpiantiTermici						
149	documento.ape2015.datiImpianti.ventilazioneMeccanica.impianto.vettoriEnergeticiUtilizzati.vettore	IfcSystem/IfcElementAssembly	ImpiantoDatiQualitativi	FonteEnergia	IfcText	N.A.	Fonte di energia utilizzata dall'impianto
150	documento.ape2015.datiImpianti.ventilazioneMeccanica.impianto.potenzaNominale	IfcSystem/IfcElementAssembly	ImpiantoDatiQualitativi	PotenzaNominale	IfcReal	kW	Potenza Nominale dell'impianto
151	documento.ape2015.datiImpianti.ventilazioneMeccanica.efficienza	IfcBuilding	FabbricatoDatiEnergetici	EfficienzaVentilazione	IfcReal	N.A.	VENTILAZIONE: efficienza globale stagionale
152	documento.ape2015.datiImpianti.ventilazioneMeccanica.prestazione.epren	IfcBuilding	FabbricatoDatiEnergetici	EPVren	IfcReal	kWh/m ²	VENTILAZIONE: Indice di prestazione rinnovabile
153	documento.ape2015.datiImpianti.ventilazioneMeccanica.prestazione.epnren	IfcBuilding	FabbricatoDatiEnergetici	EPVnren	IfcReal	kWh/m ²	VENTILAZIONE: Indice di prestazione non rinnovabile

Tabella 5 - Mappatura XML-IFC sull'impianto di ventilazione Meccanica

Come già descritto per l'ACS sono stati definiti:

- Parametri condivisi:
 - Accedere alla famiglia dell'elemento (es. UTA) → *Gestisci* → *Parametri* condivisi;
 - Generare un nuovo gruppo denominato “*ImpiantiDatiQualitativi*”;
 - Inserire i parametri necessari.

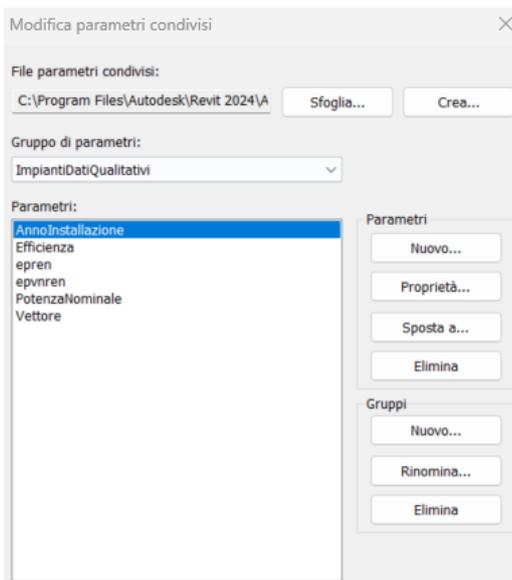


Figura 89 - Generazione dei parametri condivisi

- Parametri di progetto:
 - Gestisci → Parametri progetto → Nuovo → Parametro condiviso;
 - Selezionare i parametri dal gruppo “ImpiantiDatiQualitativi”;
 - Assegnarli alla categoria “Meccanico”.

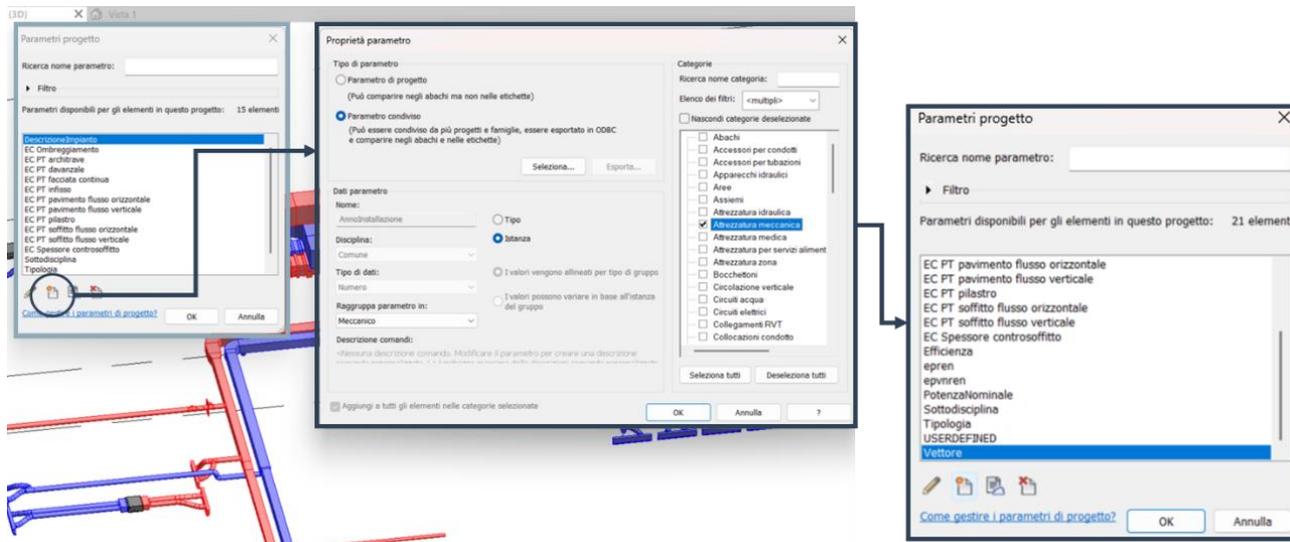


Figura 90 - Impostazioni per inserire i parametri di progetto

Per garantire che i parametri personalizzati venissero riconosciuti correttamente nel file IFC, è stato necessario intervenire sul file di configurazione utente utilizzato da Revit per la gestione dei Property Set personalizzati.

PropertySet:	<u>ImpiantiDatiQualitativi</u>	I	<u>IfcElementAssembly</u>
Tipologia	Text	USERDEFINED	
Descrizione	Text	<u>DescrizioneImpianto</u>	
AnnoInstallazione	Real		
FonteEnergia	Text	Vettore	
PotenzaNominale	Real		
EfficienzaVentilazione	Real	Efficienza	
EPVren	Real	epren	
EPVnren	Real	epnren	

Figura 91 - File di configurazione con i Pset

Una volta completata la compilazione dei campi in Revit, si è proceduto all'esportazione in IFC4. Il file è stato sottoposto a verifica in Solibri, che ha confermato la correttezza della struttura dei dati, la loro leggibilità e l'associazione agli oggetti dell'impianto.

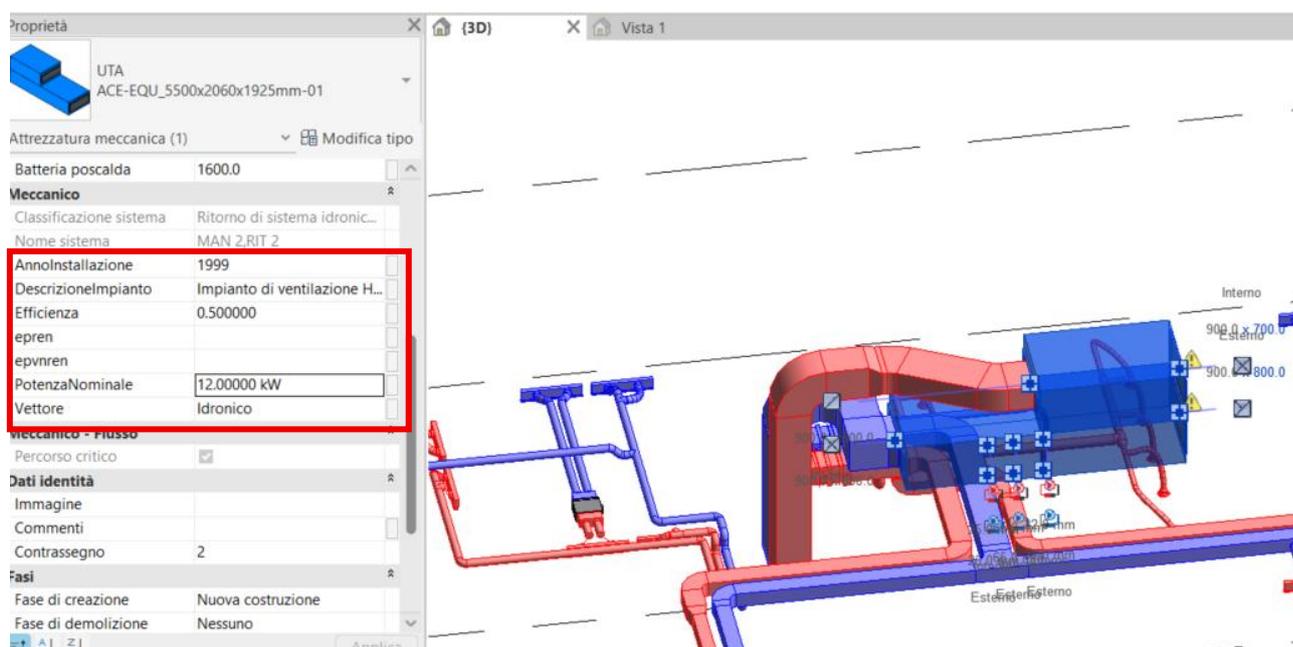


Figura 92 - Visualizzazione proprietà con i parametri di progetto inseriti

INFO	
Assembly.3.1	
BIM Data	IFC Standard Properties
Other Properties	
ImpiantiDatiQualitativi	
Property	Value
= AnnoInstallazione	1,999
= Descrizione	Impianto di ventilazione HVAC
= EfficienzaVentilazione	0.5
= FonteEnergia	Idronico
= PotenzaNominale	12
= Tipologia	UTA

Figura 93 - Visualizzazione in Solibri dei Pset inseriti per l'impianto di ventilazione

INTEGRAZIONE AUTOMATICA

In questa sezione, si procede con l'analisi dell'automazione del processo di integrazione tra dati energetici e modello BIM, precedentemente svolto in modalità manuale. Tale automatizzazione è resa possibile dall'impiego del prototipo di visualizzatore GEEDI, una piattaforma sviluppata nell'ambito del progetto omonimo, concepita per associare automaticamente le entità IFC ai dati energetici contenuti nei file XML dell'APE. Il visualizzatore ha svolto un ruolo cruciale durante la fase di validazione, grazie alla sua funzione di fusione (fuse), che consente di generare un modello IFC arricchito. Questo modello integra le informazioni geometriche BIM con i dati energetici certificati, creando un file unico e dettagliato.

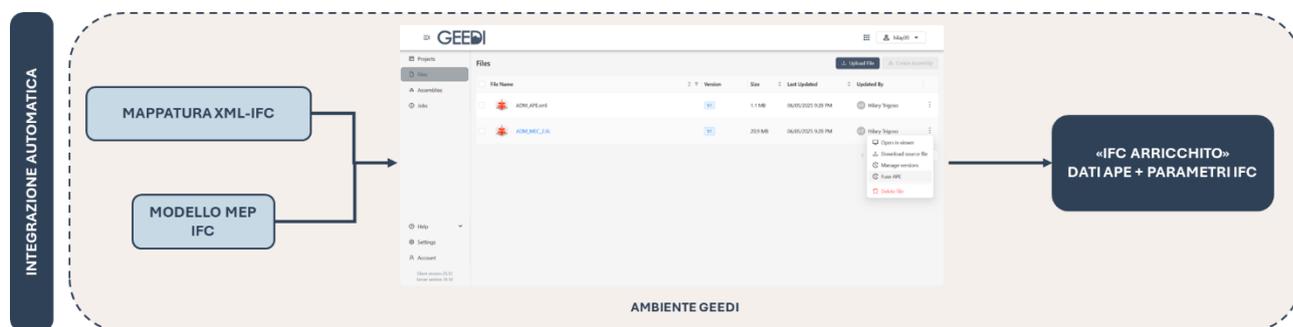


Figura 94 - Schema integrazione automatica

L'obiettivo di questa fase è verificare l'efficacia del visualizzatore, testando la correttezza del flusso di integrazione su più casi studio, individuando eventuali criticità e proponendo accorgimenti per migliorare ulteriormente lo strumento. Il processo in esame consente di validare il risultato a livello BIM, verificando se l'integrazione automatica avvenga correttamente su ciascun componente impiantistico.

Il visualizzatore GEEDI è un servizio online di una piattaforma, caratteristica che rappresenta un vantaggio significativo in termini di accessibilità e usabilità, in quanto non richiede installazioni locali. Per avviare il processo di fusione, è necessario caricare due file:

- Il modello IFC, contenente la geometria e la struttura informativa dell'edificio;
- Il file XML dell'APE, che contiene i dati energetici certificati.

Una volta caricati, è possibile attivare l'operazione "Fuse APE", che consente di avviare il processo di integrazione automatica.

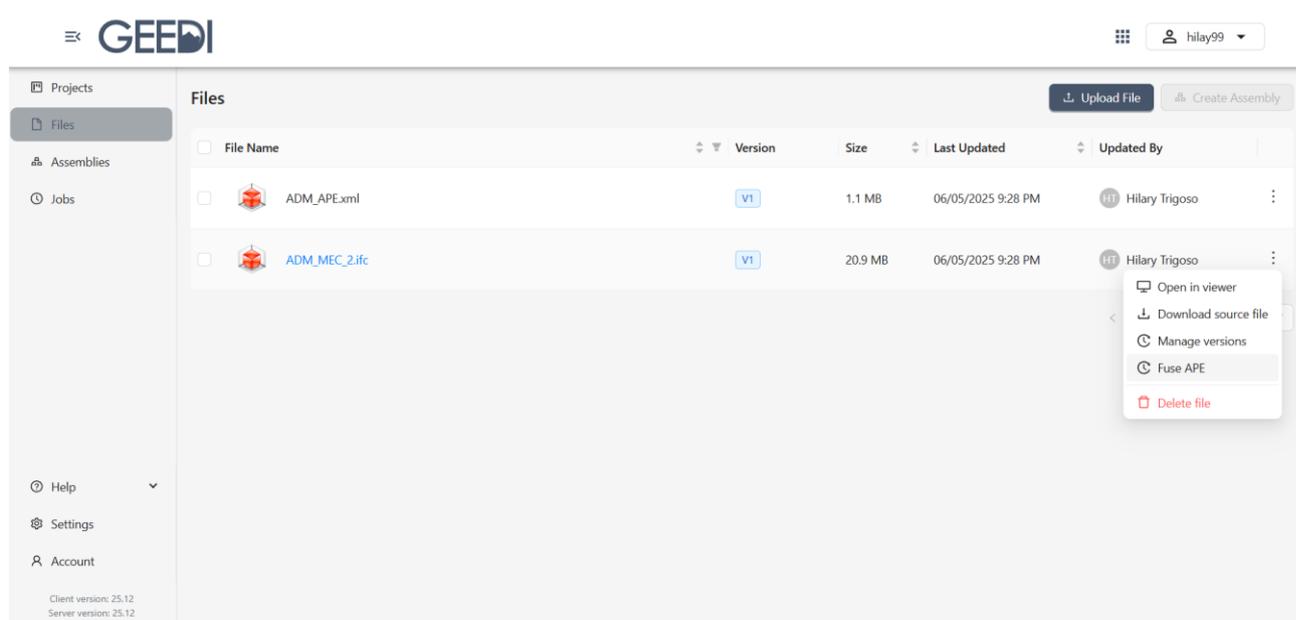


Figura 95 - Operazione di fusione dei file IFC e APE XML nel visualizzatore GEEDI

CASO STUDIO: IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE

Analizzando nel dettaglio un impianto di climatizzazione, dopo l'operazione di fusione si accede a un'interfaccia grafica divisa in due sezioni: una dedicata ai dati IFC, l'altra ai dati APE. In tale fase, il visualizzatore ha correttamente integrato le informazioni precedentemente mappate, suddivise in due PropertySet:

- PSET_Quantitativi, contenente dati numerici (es. potenza, rendimento);
- PSET_Qualitativi, contenente dati descrittivi (es. tipologia, fluido termovettore).

Properties

IFC APE

Name	Value
ImpiantoDatiGeneratore	
Combustibile	Energia elettrica
Descrizione	Pompa di calore - H+V
Efficienza	287.783400
EnergiaElettrica	1066.798900
EnergiaInIngresso	66883.368900
Fabbisogno	164774.436000
FluidoTermovettore	Acqua
Perdite	0.000000
PotenzaNominale	444.500000
SPF	2.463600
Ubicazione	In centrale termica
+ ImpiantoDatiQualitativi	

Figura 96 - Proprietà di una pompa di calore selezionata: presenza dei PropertySet dell'APE

Selezionando le varie zone energetiche del modello, è possibile evidenziare automaticamente i generatori associati (ad esempio, pompe di calore), che vengono evidenziati graficamente in arancione. Questo conferma il corretto riconoscimento delle entità e il completamento del processo di match.

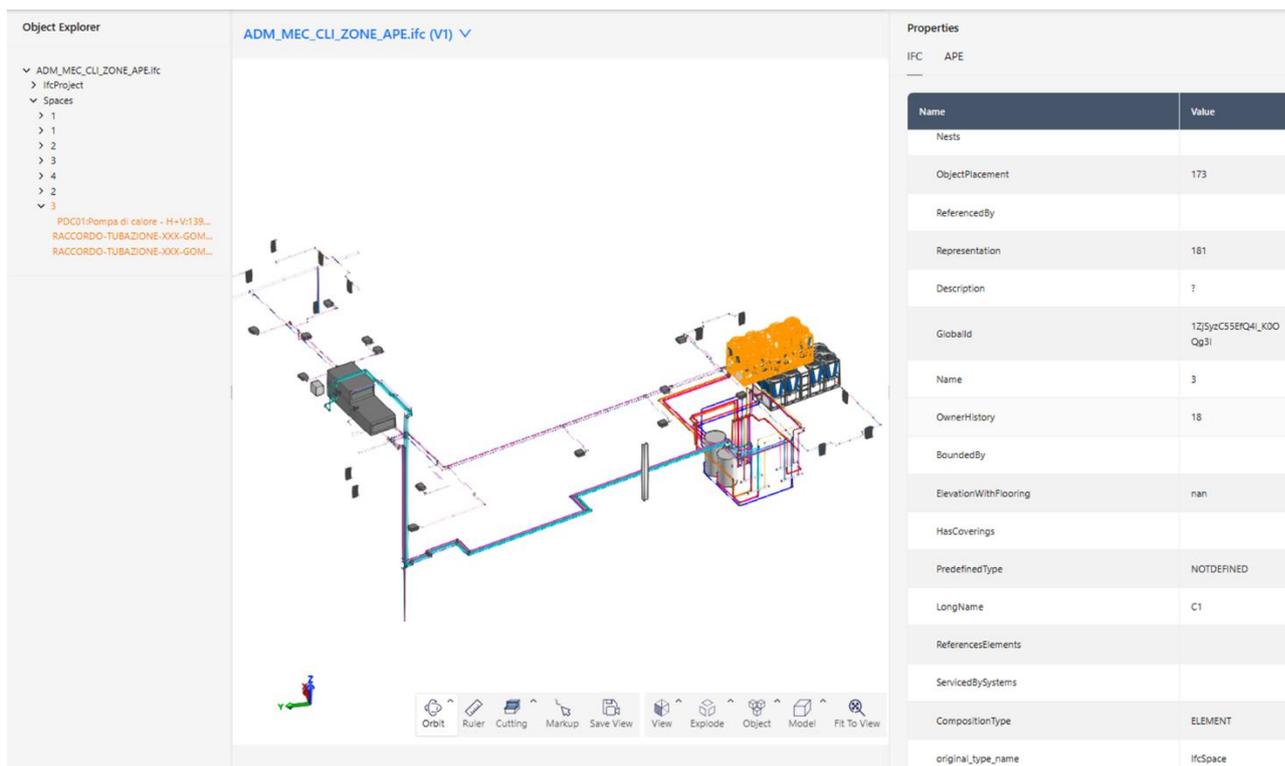


Figura 97 - Visualizzazione del modello all'interno del visualizzatore GEEDI

I dati importati dal file XML dell'APE risultano visibili all'interno del visualizzatore, associati all'oggetto selezionato, confermando la corretta integrazione delle informazioni.

GESTIONE DI IMPIANTI MULTIPLI E SOVRAPPOSIZIONI

Nel caso di modelli contenenti impianti multipli (ad esempio, climatizzazione e produzione di acqua calda sanitaria), è stato necessario prima eseguire l'unione e il coordinamento dei modelli su Revit, garantendo che (paragrafo 5.1.1):

- Ogni impianto fosse correttamente associato alle rispettive zone energetiche;
- I nomi degli oggetti fossero coerenti con quelli presenti nell'APE;
- I circuiti di appartenenza fossero esplicitamente definiti.

Tali accorgimenti si rivelano essenziali per garantire che, una volta importato il file IFC all'interno di GEEDI, la corrispondenza tra componenti energetici e dati APE avvenga in modo accurato.

Properties	
Name	Value
ImpiantoDatiGeneratore	
Combustibile	Energia elettrica
Descrizione	Pompa di calore - C
Efficienza	355.000000
EnergiaElettrica	0.000000
EnergiaInIngresso	8951.836600
Fabbisogno	31779.019700
FluidoTermovettore	Acqua
Perdite	0.000000
PotenzaNominale	315.000000
SPF	0.000000
Ubicazione	In centrale termica
+ ImpiantoDatiQualitativi	

Properties	
Name	Value
ImpiantoDatiGeneratore	
Combustibile	Energia elettrica
Descrizione	Pompa di calore - W
Efficienza	301.478200
EnergiaElettrica	0.000000
EnergiaInIngresso	2018.323800
Fabbisogno	5823.719600
FluidoTermovettore	Acqua
Perdite	0.000000
PotenzaNominale	3.757100
SPF	2.885400
Ubicazione	In centrale termica
+ ImpiantoDatiQualitativi	

Figura 98 - Proprietà di due generatori: pompa di calore C (sx) e pompa di calore W (dx)

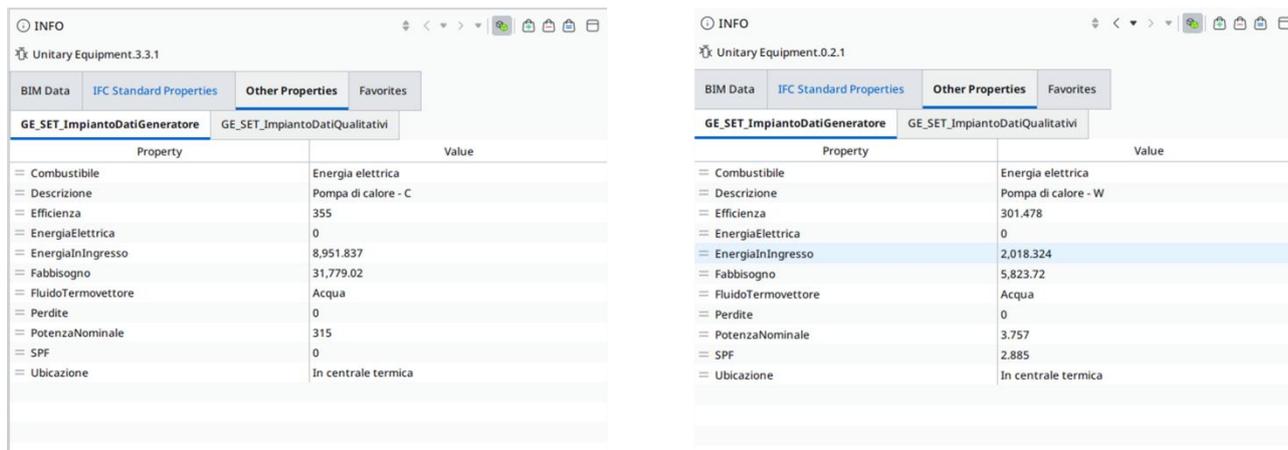
Inoltre, il sistema ha dimostrato di essere in grado di distinguere correttamente i componenti, associando automaticamente i dati corrispondenti, anche in presenza di più generatori.

ESPORTAZIONE E VERIFICA FINALE DEL MODELLO ARRICCHITO

Una volta completata la fusione, il visualizzatore consente l'esportazione del modello IFC arricchito, che può essere successivamente visualizzato e verificato in altri software compatibili (ad esempio *BIMVision*, *OpenIfcViewer*).

All'interno del file IFC generato, i nuovi attributi energetici risultano correttamente visualizzati anche in altri software di visualizzazione IFC.

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica



Property	Value
Comustibile	Energia elettrica
Descrizione	Pompa di calore - C
Efficienza	355
EnergiaElettrica	0
EnergiaIngresso	8,951.837
Fabbisogno	31,779.02
FluidoTermovettore	Acqua
Perdite	0
PotenzaNominale	315
SPF	0
Ubicazione	In centrale termica

Property	Value
Comustibile	Energia elettrica
Descrizione	Pompa di calore - W
Efficienza	301.478
EnergiaElettrica	0
EnergiaIngresso	2,018.324
Fabbisogno	5,823.72
FluidoTermovettore	Acqua
Perdite	0
PotenzaNominale	3.757
SPF	2.885
Ubicazione	In centrale termica

Figura 99 - Visualizzazione dei pset generati da GEEDI

L'intero processo ha dimostrato che il visualizzatore GEEDI è in grado di automatizzare il workflow di integrazione APE-IFC in modo efficace, replicando il risultato ottenibile manualmente ma con tempi ridotti e maggiore affidabilità.

RISULTATI

Il presente capitolo è dedicato all'analisi dei risultati ottenuti attraverso la sperimentazione della metodologia proposta per l'integrazione dei dati dell'Attestato di Prestazione Energetica (APE) all'interno dei modelli digitali in formato IFC. Il fine ultimo della ricerca è stato quello di definire un flusso operativo strutturato, interoperabile e automatizzabile, in grado di favorire la digitalizzazione dei dati energetici e la gestione efficiente del patrimonio edilizio esistente, secondo i principi dell'openBIM. La validazione della metodologia è stata condotta su scenari operativi distinti, ognuno dei quali ha contribuito a testare concretamente l'efficacia, i limiti e le potenzialità del processo proposto. Il caso studio utilizzato per la sperimentazione è rappresentato dalla Caserma "Litta Modignani" di Pinerolo, oggetto di intervento nell'ambito del progetto GEEDI.

In una fase iniziale, l'attenzione si è concentrata sulla valutazione dell'esportazione IFC da Revit tramite impostazioni standard, una procedura ampiamente diffusa nell'ambito professionale. L'analisi ha evidenziato criticità significative, a partire dalla perdita di informazioni energetiche e impiantistiche fondamentali. Le entità modellate, spesso convertite in oggetti generici come *IfcBuildingElementProxy*, risultano prive di un'identità semantica adeguata, limitando le possibilità di utilizzo del modello per finalità energetiche. Inoltre, l'assenza di attributi compatibili con la struttura informativa degli APE impedisce un'efficace associazione automatica, compromettendo la comunicazione tra i due domini. L'utilizzo di visualizzatori openBIM ha confermato l'incompletezza strutturale e informativa dei file esportati, sottolineando la necessità di adottare strategie di modellazione più avanzate, orientate alla coerenza semantica e alla standardizzazione dei dati. Per superare tali limiti, è stato implementato un primo scenario operativo basato su una modellazione consapevole del modello BIM, accompagnata da una mappatura semantica dei parametri energetici in conformità allo standard IFC. In questa fase è stata eseguita una riclassificazione accurata degli elementi impiantistici, evitando l'uso di entità generiche, ed è stato predisposto un set di proprietà personalizzato attraverso parametri condivisi. La configurazione dell'export IFC è stata personalizzata all'interno dell'ambiente Revit, così da garantire la corretta associazione e visibilità delle informazioni nei Property Set. I modelli ottenuti hanno mostrato una maggiore coerenza informativa e una struttura più adatta all'integrazione energetica, risultando leggibili e interoperabili nei principali visualizzatori openBIM.

In considerazione di tali elementi, è stato sviluppato un ulteriore scenario, basato sull'integrazione manuale dei dati energetici direttamente all'interno dell'ambiente Revit. Questo approccio ha richiesto una serie di operazioni complesse, sia in termini procedurali che temporali. Ogni componente impiantistica è stata sottoposta a un processo di verifica e, laddove necessario, a una rielaborazione della classificazione IFC, al fine di garantire un'interpretazione semantica corretta al momento dell'esportazione. È stato inoltre necessario generare parametri di progetto specifici e parametri condivisi, al fine di renderli visibili nel file IFC e riconoscibili dai visualizzatori. Inoltre, la configurazione del file

DefaultUserDefinedParameterSets.txt ha consentito l'inclusione di tali parametri nei Property Set dell'output IFC. Nonostante la conferma della fattibilità tecnica di arricchire il modello con informazioni provenienti dall'APE, il processo si è rivelato estremamente oneroso e poco efficiente. La procedura ha richiesto un intervento diretto su ogni singola entità, una conoscenza approfondita dello standard IFC e delle logiche di esportazione, nonché una costante attività di verifica manuale per garantire che i dati fossero effettivamente associati e leggibili. In considerazione di un esito positivo, l'impiego di tempo, risorse e competenze si è rivelato considerevole, rendendo l'approccio difficilmente replicabile su vasta scala. La scalabilità dell'intero processo si è rivelata limitata, soprattutto in caso di edifici complessi. La verifica dei file IFC ottenuti, condotta tramite visualizzatori openBIM e confronto con i dati XML dell'APE, ha confermato la validità di tale approccio

L'ultimo scenario sperimentale ha invece previsto l'utilizzo del visualizzatore GEEDI, sviluppato all'interno del progetto di ricerca omonimo. Questo strumento introduce un approccio automatizzato all'integrazione dei dati APE, basato su una funzione di fusione (fuse) che consente di collegare direttamente i dati in formato XML alle entità IFC del modello. A differenza del metodo manuale, la piattaforma è in grado di riconoscere automaticamente la semantica delle entità presenti nel modello (ad esempio IfcBoiler, IfcSpace, IfcDistributionSystem) e di associare correttamente le informazioni provenienti dall'APE ai rispettivi Property Set. Il processo è stato sottoposto a test su modelli reali, tra cui quello della Caserma, conformemente alle linee guida metodologiche stabilite durante la fase di sviluppo. I risultati ottenuti sono stati estremamente incoraggianti. I dati energetici sono stati inseriti nei modelli in modo accurato e con tracciabilità completa, senza necessità di interventi manuali. In contesti complessi, caratterizzati da impianti multipli o generatori federati, GEEDI ha dimostrato di garantire un elevato livello di coerenza semantica e robustezza operativa. Il modello risultante è perfettamente leggibile dai principali visualizzatori openBIM, pronto per essere integrato in flussi più ampi, come quelli legati al Digital Building Logbook o al Building Renovation Passport.

Il confronto tra le due modalità di integrazione, manuale e automatica, evidenzia chiaramente i vantaggi dell'approccio automatizzato. Dal punto di vista tecnico, entrambe le soluzioni sono in grado di generare modelli IFC arricchiti, semantici e interoperabili. Tuttavia, il metodo manuale comporta un carico operativo significativamente maggiore, richiede una verifica costante e presenta un elevato rischio di errore umano. Ogni parametro deve essere creato, associato, esportato e sottoposto a controllo in modo manuale. In alternativa, il sistema automatico proposto da GEEDI consente un allineamento rapido, affidabile e sistematico tra i dati del file XML e le entità IFC del modello, riducendo drasticamente tempi e margini di errore. Inoltre, l'automazione del processo ne garantisce un'uniformità che ne facilita la replicazione in contesti diversificati e l'implementazione su vasta scala.

Punti di attenzione e sviluppi futuri

Nel complesso, la metodologia sviluppata ha ottenuto una validazione ampiamente positiva. L'approccio manuale ha dimostrato la fattibilità tecnica dell'integrazione, ma ha altresì evidenziato limiti pratici significativi in termini di gestione, tempo e risorse. In alternativa, l'integrazione automatica proposta da GEEDI si presenta come una soluzione scalabile, efficiente e pienamente compatibile con i principi openBIM, oltre che conforme alle recenti direttive europee in materia di digitalizzazione e sostenibilità del patrimonio edilizio. La sperimentazione ha altresì messo in luce alcune problematiche che necessitano di ulteriori approfondimenti: tra queste, la necessità di una maggiore attenzione alla qualità dell'export IFC da Revit, che deve essere configurato in maniera più avanzata per garantire l'integrità dei dati; l'allineamento semantico tra file APE e modello IFC, che richiede un'armonizzazione nazionale delle nomenclature e delle strutture dati; e la gestione di modelli complessi o federati, che impone l'adozione di logiche di controllo e validazione più sofisticate. In conclusione, i risultati ottenuti evidenziano che l'integrazione strutturata e semantica dei dati APE nei modelli BIM rappresenta oggi una prospettiva concreta e realizzabile. Il passaggio da un documento statico a una risorsa digitale attiva rappresenta un cambiamento di paradigma per la gestione dell'efficienza energetica, e fornisce le basi per la costruzione di un ecosistema digitale realmente interoperabile, al servizio della transizione energetica e della sostenibilità del patrimonio edilizio.

Alla luce delle considerazioni sopra esposte, gli sviluppi futuri della metodologia dovrebbero orientarsi verso direttrici fondamentali. Una delle priorità sarà quella di favorire l'armonizzazione tra gli standard informativi, sviluppando ontologie condivise o livelli di traduzione semantica in grado di facilitare l'interoperabilità tra i diversi schemi APE regionali e lo standard IFC, superando così la frammentazione attuale. Parallelamente, l'integrazione di tecniche di intelligenza artificiale e apprendimento automatico rappresenta una direzione promettente: tali strumenti potranno supportare l'automatizzazione del riconoscimento, della classificazione e dell'associazione dei dati all'interno dei modelli BIM, riducendo gli errori e migliorando l'efficienza del processo. Un ulteriore sviluppo rilevante riguarda la correlazione tra dati statici, come quelli degli APE, e sistemi di monitoraggio in tempo reale. L'integrazione di informazioni provenienti da sensori, dispositivi IoT e piattaforme di gestione energetica consentirebbe la creazione di un Digital Building Logbook dinamico, in grado di aggiornare costantemente le prestazioni reali dell'edificio e supportare decisioni informate in ambito gestionale e manutentivo. Infine, per garantire l'effettiva applicabilità della metodologia su vasta scala, sarà necessario sviluppare soluzioni scalabili e compatibili con ambienti cloud. Questo approccio consente la distribuzione della metodologia su piattaforme pubbliche o istituzionali, in grado di gestire ampi volumi di dati e operare come nodi informativi per la digitalizzazione del patrimonio costruito.

In sintesi, affrontare tali sfide rappresenta il naturale proseguimento del presente lavoro di ricerca, con l'obiettivo di rafforzare l'interoperabilità semantica tra il dominio dell'energia e quello del Building

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica

Information Modeling (BIM), promuovendo una rappresentazione digitale sempre più intelligente, reattiva e sostenibile dell'ambiente costruito.

CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi si inserisce nel più vasto processo di digitalizzazione e decarbonizzazione del patrimonio edilizio, ponendo particolare attenzione all'interoperabilità tra modelli informativi BIM (Building Information Modeling) e i dati energetici derivanti dall'Attestato di Prestazione Energetica (APE). In un contesto normativo sempre più orientato alla sostenibilità, come evidenziato dalla recente rifusione della Direttiva EPBD, diventa fondamentale superare le attuali discontinuità informative tra le diverse fonti e formati di dati, per garantire un uso efficiente e coordinato delle informazioni lungo tutto il ciclo di vita dell'edificio. L'obiettivo primario del lavoro è stato quello di proporre e validare una metodologia che consenta l'integrazione automatica dei dati contenuti nell'APE, in formato XML, all'interno dei modelli IFC, secondo un approccio OpenBIM. Il percorso delineato ha consentito di affrontare e superare le principali criticità associate all'esportazione IFC da software di authoring come Revit, spesso responsabili della perdita di informazioni significative, della classificazione generica degli elementi impiantistici e della mancanza di attributi necessari per la simulazione energetica. Attraverso un processo di modellazione avanzata, è stato possibile risolvere le incoerenze iniziali e strutturare il modello IFC secondo una logica semantica coerente con i requisiti dell'interoperabilità. Questo ha favorito la creazione di modelli BIM "arricchiti" non solo dal punto di vista geometrico, ma anche informativo, rendendoli adatti a essere utilizzati come base per simulazioni, valutazioni prestazionali e strumenti di gestione energetica come il Digital Building Logbook.

La metodologia è stata sottoposta a test su casi studio reali, mediante due principali approcci: l'integrazione manuale dei dati APE all'interno del modello Revit, utilizzando Property Set personalizzati, e l'integrazione automatica tramite il visualizzatore GEEDI, che ha dimostrato la possibilità di effettuare una fusione automatica tra file IFC e file XML, con una significativa riduzione dei tempi e dei margini di errore. L'approccio già menzionato si è dimostrato particolarmente efficace in virtù della sua scalabilità e replicabilità, costituendo un solido fondamento per l'adozione di flussi digitali orientati alla gestione intelligente degli edifici. L'analisi dei risultati ha messo in luce come l'approccio sviluppato consenta non solo di migliorare la qualità e la tracciabilità delle informazioni, ma anche di favorire l'interoperabilità tra strumenti e attori diversi, rendendo possibile il riutilizzo dei dati per finalità diverse: dalla simulazione energetica alla gestione operativa, dalla manutenzione programmata alla pianificazione degli interventi di riqualificazione. Il lavoro svolto rappresenta pertanto un contributo sostanziale al superamento delle barriere informative tra il settore della certificazione energetica e quello della modellazione digitale, delineando le basi per future evoluzioni legate all'intelligenza artificiale, al digital twin e alla costruzione di un ecosistema digitale coerente e sostenibile.

ACKNOWLEDGMENTS

Desidero esprimere la mia più sincera gratitudine a tutte le persone e agli enti che hanno reso possibile lo svolgimento di questo lavoro di tesi.

Si ringrazia l'azienda Edilclima S.r.l. per la collaborazione e il supporto fornito durante il periodo di tirocinio, che ha costituito la base operativa e metodologica per lo sviluppo del presente elaborato. L'azienda ha messo a disposizione competenze, strumenti e risorse utili, garantendo un ambiente tecnico-professionale adeguato all'approfondimento dei temi trattati.

Si ringrazia inoltre l'Agenzia del Demanio per aver fornito la documentazione tecnica e i modelli informativi necessari all'analisi del caso studio, rendendo possibile una validazione concreta del flusso operativo proposto.

Un ulteriore ringraziamento è rivolto al laboratorio Drawing TO the Future del Politecnico di Torino, per il supporto scientifico e operativo fornito nel corso dell'intero lavoro di tesi, e per l'assistenza nelle fasi di modellazione, verifica e sperimentazione.

A tutti loro, va il mio più sincero riconoscimento per aver contribuito in modo decisivo al raggiungimento di questo traguardo.

RINGRAZIAMENTI

A me stessa

Per una volta, voglio iniziare ringraziando me stessa. Sì, proprio così: mettermi al primo posto. Una volta avresti pensato di non farcela, che fosse tutto troppo complicato. E invece guarda dove sei ora. È stato un percorso tutt'altro che semplice, e lo so bene. Hai lottato, sofferto, ti sei persino messa da parte a volte, ma ogni sacrificio è servito a qualcosa di più grande. Hai affrontato ostacoli, cadute, pianti infiniti. Ma oggi sei qui, alla fine di questo cammino, più forte di prima.

Grazie per non aver mollato, per aver resistito, per la tua tenacia. Questo traguardo è una prova concreta della tua forza. Che ti serva da promemoria: non dimenticare mai dove vuoi arrivare, ma soprattutto da dove sei partita.

Grazie per aver superato i pregiudizi, per aver affrontato le difficoltà a testa alta, per aver vissuto questa esperienza fino in fondo.

Grazie di cuore.

Mamma e papà

Un ringraziamento speciale va a voi, mamma e papà, le mie colonne portanti. Grazie per tutti i sacrifici che avete fatto, e che continuate a fare, per me e per Billy. So che non è stato facile e che non lo è ancora oggi.

Mamma

A te, mamma, la mia roccia.

Sei stata la mia forza silenziosa, il mio rifugio sicuro in ogni tempesta. Ti ringrazio con tutto il cuore per avermi sostenuto sempre, incondizionatamente, anche quando non avevi nulla da dare se non il tuo amore, che è stato tutto.

Grazie per avermi teso la mano nei momenti più difficili, per avermi sollevata quando stavo per crollare, per essere stata accanto a me anche nei giorni più bui, quando tutto sembrava andare in frantumi.

Sei stata la mia confidente, la mia guida, la mia migliore amica: a te ho potuto raccontare tutto, affidarmi senza paura, piangere, ridere, trovare sempre un consiglio sincero o anche solo un silenzio che sapeva contenere.

Mi hai trasmesso la stessa sicurezza di quando ero bambina e camminavamo insieme, mano nella mano. Ricordo quando stavo per inciampare e tu, con una sola mano, mi sollevavi

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica

come se niente potesse farmi cadere. E ancora oggi sei così: pronta a tenermi su quando ne ho bisogno.

Grazie, mamma, per avermi difesa, compresa, supportata e amata anche quando io stessa non riuscivo. Sei sempre stata lì, in ogni passo, in ogni caduta, in ogni risalita.

Non so se riuscirò mai a ripagarti per tutto quello che mi hai dato, non solo materialmente, ma soprattutto per ciò che non si può quantificare: il tuo tempo, la tua forza, la tua dedizione, la tua presenza, il tuo amore.

Ti guardo e vedo una donna incredibilmente forte, anche se spesso non te ne rendi conto. Per me sei un esempio, il mio modello, la mia supereroina, sì, proprio così, la mia supereroina personale.

Tutto questo percorso, questa tesi, questo traguardo, sono anche tuoi. Senza di te, non sarei mai arrivata fin qui.

Grazie di cuore, mamma. Ti voglio infinitamente bene.

Papà

Testardo ma dal cuore immenso. So quanto anche tu abbia sofferto, lasciando la tua terra, ma l'hai fatto per darci un futuro migliore, e non hai mai smesso di crederci, come mi hai detto diverse volte "l'ho fatto per un futuro migliore, per voi figli miei, e non me ne pento".

A te, papino, che con la tua forza silenziosa e la tua presenza costante sei stato un punto fermo in tutto questo viaggio.

Grazie per i tuoi consigli nei momenti in cui ne avevo più bisogno, per le infinite passeggiate in cui mi hai ascoltata sfogare, anche quando avevo solo bisogno di parlare e sentirmi capita. Grazie per quelle uscite in macchina dove, più che le parole, contava il semplice stare insieme, quel silenzio pieno d'affetto che solo tu sai offrirmi.

Sei stato accanto a me nei momenti più difficili, anche quando forse non sapevi cosa dire, ma c'eri. E questo, per me, ha fatto tutta la differenza.

Ti ringrazio anche per avermi trasmesso la tua passione per la musica, che è diventata un rifugio in tanti momenti complicati, un'ancora nei giorni in cui avevo bisogno di staccare dal mondo. È un pezzo di te che porto sempre con me.

Grazie alla tua forza, ho sempre saputo che avrei potuto contare su di te.

Non sempre ti ho detto quanto ti sono grata, ma oggi voglio dirtelo forte: grazie papà, per esserci stato, per esserci sempre. Ti voglio bene.

A voi due dedico questa tesi, l'ultimo traguardo di questa lunga strada universitaria. Avete sempre creduto in me, spesso più di quanto io stessa riuscissi a fare. Vi voglio un bene immenso, e spero che lo sappiate, anche quando discutiamo. Siete le fondamenta della mia vita. Grazie.

Billy

Grazie per avermi fatto utilizzare il monitor che mi ha aiutata a finire la tesi, ahah! Scherzo.

Fratellino mio, grazie per esserci sempre stato.

Ti chiedo scusa se a volte non sono riuscita a starti accanto quanto avrei voluto, ma tu non hai mai mancato di farlo per me.

Grazie per il tempo che mi hai dedicato, per avermi ascoltata, consolata, fatta ragionare quando ne avevo bisogno.

Per la tua età, hai una saggezza sorprendente. So di averti fatto crescere in fretta, forse troppo in fretta, ma sappi che sei una delle persone più importanti della mia vita.

Ti ho sempre detto che sei quasi come un figlio per me, no?

Grazie anche per i gesti pratici – tipo quel monitor che mi ha aiutata a finire la tesi, ahah!

Spero che questo mio traguardo non ti faccia sentire all'ombra, ma ti spinga a inseguire i tuoi sogni.

Non importa quanto ci metterai: l'importante è arrivare dove desideri. Io sarò sempre qui per te.

Vai avanti con serenità. Sono fiera di te.

Mamà Tonita

Nonnina mia, questa tesi è anche per te.

Sei stata una figura fondamentale nella mia vita.

Grazie per tutto quello che hai fatto per me, per avermi cresciuta con amore, per i tuoi insegnamenti e per i sacrifici che hai affrontato senza mai chiedere nulla in cambio.

Mi manchi ogni giorno, e vorrei che oggi, in un momento così importante per me, tu fossi qui accanto.

So che forse non leggerai mai queste parole, ma spero che in qualche modo ti arrivino.

Ti voglio un bene immenso, mamà aceituna. Spero di rivederti presto.

Papà Beni

A te, nonnino mio, che ora mi guardi da lassù.

Spero che tu possa essere fiero di me, del cammino che ho fatto e del traguardo che sto raggiungendo.

Purtroppo non abbiamo avuto tanto tempo insieme, e questo mi dispiace profondamente. Mi manca tutto quello che non abbiamo potuto vivere, mi dispiace non essere stata lì con te nei tuoi momenti di malessere, non averti potuto salutare un'ultima volta come avrei voluto.

Ma il tempo che abbiamo condiviso rimane indelebile nel mio cuore: i tuoi abbracci caldi, le chiacchierate serene, le risate leggere, e quella tua barba che, ogni volta che mi stringevi forte, mi faceva il solletico sulle guance.

Mi hai accolto a casa tua e mi hai visto crescere, e io porterò sempre con me quell'amore puro che sapevi donare con semplicità.

Spero che, ovunque tu sia, tu possa vedermi e sorridere, fiero della nipotina che hai visto diventare grande.

Ti voglio un mondo di bene, papà Beni. Sempre.

Amiche

Finalmente siamo arrivate insieme a questo ultimo traguardo, fianco a fianco, come lo siamo state in tanti altri momenti.

Abbiamo condiviso così tanto lungo questo percorso universitario: gioie, fatiche, dubbi, paure... ma anche risate, abbracci, confidenze. Con voi accanto, tutto è sembrato un po' più semplice, più leggero, anche nei giorni più pesanti.

Abbiamo affrontato insieme momenti difficili, i piantini disperati, ma anche le piccole grandi vittorie quotidiane.

E ora eccoci qui, ancora insieme, a chiudere questo capitolo con il sorriso (e magari ancora qualche lacrima, ma questa volta di felicità).

Vi voglio bene e vi ringrazio dal profondo del cuore per essere state parte così viva e preziosa di questa esperienza.

"El Club"

Grazie a voi, amici incontrati al coro universitario, per la vostra presenza, per la vostra compagnia, per avermi fatto sentire meno sola.

Siete stati un sostegno prezioso lungo il cammino. Spero che la nostra amicizia continui anche oltre questo traguardo.

A tutti coloro che mi sono stati accanto

Un ringraziamento sentito a tutte le persone che, in un modo o nell'altro, mi hanno accompagnata lungo questo percorso: amici, familiari, conoscenti.

Ognuno di voi ha contribuito a portarmi fin qui. Grazie, davvero.

ACRONIMI

BIM, Building Information Modelling

BEM, Building Energy Model

MEP, Mechanical Electric Plumbing

APE, Attestato di Prestazione Energetica

EPC, Energy Performance Coefficient

XML, eXtensible Markup Language

GEEDI, Gestione Energetica degli Edifici attraverso processi di Data Analysis e Building Information Modelling

IFC, Industry Foundation Classes

DBL, Digital Building Logbook

BRP, Building Renovation Passport

GWP, Global Warning Potential

CDE, Common Data Environment

LCA, Life Cycle Analysis

UBEM, Urban Building Energy Modeling

LOD, Level Of Detail

BMS, Building Management System

bSDD, BuildingSMART Data Dictionary

MVD, Model View Definition

BCF, BIM Collaboration Format

IDM, Information Delivery Manual

IDS, Information Delivery Specification

gbXML, Green Building XML

STEP, Standard for the Exchange of Product

nZEB, Nearly Zero Energy Building

BEPS, Building Energy Performance Standard

UTA, Unità Trattamento Aria

Analisi e applicazione di metodologia openBIM nell'ambito della certificazione energetica

ACS, Acqua Calda Sanitaria

ADM, Agenzia del Demanio

BIMMS, Building Information Modeling Method Statement

ENEA, Ente Nazionale per l'Efficienza Energetica

Pset, Property Set

INDICE FIGURE

Figura 1 - Emissioni di gas serra nel mondo [Fonte: EDGAR].....	4
Figura 2 – Tipologia di informazioni contenute nel DBL [10]	11
Figura 3 - Sondaggio funzionalità DBL [11]	12
Figura 4 - Esempio scrittura XML	18
Figura 5 – Ambiti applicazione BIM [33].....	21
Figura 6 – Diverse modalità di scambio dati.....	24
Figura 7 - Flusso OpenBIM [37].....	25
Figura 8 – Principali standard OpenBIM	26
Figura 9 – Esempio flusso OpenBIM.....	28
Figura 10 - Evoluzione IFC nel corso degli anni [40].....	30
Figura 11 - Esempio del linguaggio EXPRESS-G e EXPRESS [43].....	31
Figura 12 - Rappresentazione standard STEP [44]	31
Figura 13 - Schema Kernel IFC4 Add2 [45]	33
Figura 14 - Schema metodologico.....	41
Figura 15 – GEEDI: Flusso piattaforma openBIM	43
Figura 16 – Inquadramento caso studio.....	44
Figura 17 - Suddivisione del complesso architettonico	44
Figura 18 - Planimetria secondo piano stato di fatto	45
Figura 19 - Schema impianto di climatizzazione	47
Figura 20 - Schema funzionamento UTA [fonte: Caleffi]	48
Figura 21 - Estratto planimetria primo piano del sistema di ventilazione	49
Figura 22 - Schema impianto di produzione ACS.....	50
Figura 23 - Estratto planimetria primo piano del sistema idraulico	51
Figura 24 - Schema identificazione elementi APE.....	52
Figura 25 - Sezione Prestazione energetica globale e del fabbricato [52].....	53
Figura 26 - Schema APE esteso	54

Figura 27 - Schema grafico XML sezione dati_Calcolo	55
Figura 28 - Tabella dell'analisi dei dati nella sezione "ape2015"	57
Figura 29 - Tabella dell'analisi dei dati nella sezione "dati_Calcolo"	57
Figura 30 - Visualizzazione degli elementi appartenenti ai cluster e alle sezioni dell'APE	58
Figura 31 - Analisi dei parametri filtrati con lo schema dell'XML	60
Figura 32 - Schema definizione metodologia OpenBIM	61
Figura 33 - Struttura mappatura IFC	61
Figura 34 - Schema mappatura IFC	62
Figura 35 - Esempio mappatura Demanio	64
Figura 36 - Grafico delle corrispondenze nazionali e internazionali	67
Figura 37 - Grafico dei cluster e delle tipologie di dato APE/IFC	68
Figura 38 - Estratto della mappatura IFC-XML	68
Figura 39 - Mappatura elementi IFC suddivisi per cluster	69
Figura 40 - Elementi APE relativi agli impianti e la loro mappatura IFC	69
Figura 41 - Schema metodologico della fase validazione metodologia	70
Figura 42 - Distribuzione dei dati impiantistici nei cluster APE	71
Figura 43 - Individuazione dei parametri che verranno implementati	71
Figura 44 - Schema validazione	73
Figura 45 - Esempio di elementi impiantistici classificati come IfcBuildingElementProxy	74
Figura 46 - Elementi IfcBuildingElementProxy nell'impianto meccanico	75
Figura 47 - Esempio rappresentazione XML del radiatore IfcBuildingElementProxy	75
Figura 48 - Classi di esportazione IFC focus sulle attrezzature speciali	76
Figura 49 - Visualizzazione in OpenIFC dell'impianto idraulico con individuazione degli IfcBuildingElementProxy	76
Figura 50 - Impianto idraulico in OpenIFC con focus sul generatore di ACS	77
Figura 51 - Estratto XML del generatore di ACS	77
Figura 52 - Tabella riassuntiva degli elementi modellati	78
Figura 53 - Impianto produzione ACS	79

Figura 54 - Tabella riassuntiva delle tubazioni	79
Figura 55 – Esempio di circuito acqua calda sanitaria	80
Figura 56 – Impostazioni generali di esportazione IFC.....	80
Figura 57 – Verifica della classificazione del WC come IfcFlowTerminal	81
Figura 58 - Impostazioni per associare un tipo di Export IFC all'oggetto.....	81
Figura 59 – Esportazione corretta del WC come IfcFlowTerminal: WCSEAT	82
Figura 60 . Passaggi per ottenere l'export corretto caso generatore ACS	82
Figura 61 - Visualizzazione sistema di mandata "MAN2" dell'impianto di ventilazione	83
Figura 62 - Abaco dei sistemi all'interno del modello di ventilazione	84
Figura 63 - Impianto di ventilazione pianta secondo piano	85
Figura 64 - Rappresentazione impianto di ventilazione vista 3D.....	85
Figura 65 - Impostazione export IFC4	86
Figura 66 - Visualizzazione impianto di ventilazione in Solibri IFC4.....	86
Figura 67 - Stralcio XML dell'IFC dell'impianto esportato.....	87
Figura 68 - Stralcio XML su un circuito "RIT2" del sistema di ventilazione	87
Figura 69 - Impostazione del tipo di export IFC sull'oggetto specifico	88
Figura 70 - Impostazione "Tipo di IFC" per l'export corretto dell'oggetto specifico valvola di estrazione aria	88
Figura 71 - Configurazione export tipo IFC dell'elemento UTA	89
Figura 72 - Vista proprietà pompe di calore.....	89
Figura 73 - Abaco dei sistemi idronici nel modello	90
Figura 74 - Impianto di climatizzazione pianta piano terra.....	91
Figura 75 - Impianto di climatizzazione pianta secondo piano	91
Figura 76 - Impianto di climatizzazione vista 3D	92
Figura 77 - Stralcio XML individuazione nome zona.....	93
Figura 78 - Pianta con la zona di pertinenza V8	93
Figura 79 - XML con pompa di calore H+V	94
Figura 80 - XML pompa di calore C	95

Figura 81 - XML con pompa di calore W	95
Figura 82 - Proprietà pompa di calore C	96
Figura 83 - Impostazione esportazione sistema.....	97
Figura 84 - Schema integrazione manuale	97
Figura 85 - Generazione parametri condivisi	99
Figura 86 - Impostazioni per inserire i parametri di progetto.....	100
Figura 87 - Visualizzazione pre e post inserimento dei parametri di progetto.....	100
Figura 88 - Visualizzazione della corretta esportazione dei parametri Pset associati al generatore di ACS	101
Figura 89 - Generazione dei parametri condivisi	103
Figura 90 - Impostazioni per inserire i parametri di progetto.....	103
Figura 91 - File di configurazione con i Pset	104
Figura 92 - Visualizzazione proprietà con i parametri di progetto inseriti.....	104
Figura 93 - Visualizzazione in Solibri dei Pset inseriti per l'impianto di ventilazione	104
Figura 94 - Schema integrazione automatica	105
Figura 95 - Operazione di fusione dei file IFC e APE XML nel visualizzatore GEEDI	106
Figura 96 - Proprietà di una pompa di calore selezionata: presenza dei PropertySet dell'APE.....	107
Figura 97 - Visualizzazione del modello all'interno del visualizzatore GEEDI.....	108
Figura 98 - Proprietà di due generatori: pompa di calore C (sx) e pompa di calore W (dx)	109
Figura 99 - Visualizzazione dei pset generati da GEEDI.....	110

INDICI TABELLE

Tabella 1 - Esempi di DBL in Europa	14
Tabella 2 - Sintesi dei parametri esclusi e motivazione	59
Tabella 3 - Rielaborazione codifica PSET [54].....	64
Tabella 4 - Mappatura XML-IFC sull'impianto ACS.....	99
Tabella 5 - Mappatura XML-IFC sull'impianto di ventilazione Meccanica	102

BIBLIOGRAFIA

- [1] IEA, IRENA & UN Climate Change High-Level Champions, «Breakthrough Agenda Report 2023,» IEA, Paris, 2023.
- [2] IEA, «2019 Global Status Report for Buildings and Construction 2019,» IEA, Paris, 2019.
- [3] R. Alonso, R. Olivadese, A. Ibba e D. Reforgiato, «Towards the definition of a European Digital Building Logbook: A survey,» *Heliyon*, vol. 9, n. 9, 2023.
- [4] A. Arcipowska, F. Anagnostopoulos, F. Mariottini e S. Kunkel, *Energy Performance Certificates across the EU*, Buildings Performance Institute Europe (BPIE), 2014.
- [5] M. Morini, F. Caffari, N. Calabrese e G. Centi, «A BIM-Based Approach to Energy,» in *A BIM-Based Approach to Energy Analysis of Existing Buildings in the Italian Context*, Rome, CONF.ITECH 2022, 2022, pp. 47-56.
- [6] Parlamento Europeo, «Ridurre le emissioni di anidride carbonica: obiettivi e politiche dell'UE,» *Articolo*, 2024.
- [7] M. Dulian, *Revision of the Energy Performance of Buildings Directive*, BRIEFING, 2024.
- [8] Parlamento europeo e del Consiglio, DIRETTIVA (UE) 2024/1275, *Official Journal of the European Union*, 2024.
- [9] European Commission, «DBL Final event to present the Technical Guidelines and project results,» European Commission, 2023.
- [10] C. Koronen e S. Gokarakonda, *Unlocking the potential of digital building logbooks for a climate-neutral building stock*, 2024.
- [11] J. Volt, Z. Toth, J. Glicker e M. De Groot, «Definition of the digital building logbook : report 1 of the study on the development of a European Union framework for buildings' digital logbook,» Publications Office of the European Union, 2020.

- [12] European Commission: Executive Agency for Small and Medium-sized Enterprises; Carbonari, G.; Ricci, M.; Dourlens-Quaranta, S.; Calderoni, M.; Loureiro, T.; Sterling, R.; Glicker, J.; Toth, Z.; Volt, J.; De Groote, M.; Borragán, G.; Paduart, A.; De Regel, S., «Building logbook state of play : report 2 of the study on the development of a European Union framework for buildings' digital logbook,» Publications Office of the European Union, 2020.
- [13] «digiGO,» [Online]. Available: <https://www.digigo.nu/ilsen-en-richtlijnen/bim-basis-ils/>.
- [14] S. Mathioudakis, P. Bourreau, Z. Lennard, N. Lasarte, E. Chochanova, A. Dugué, F. Sigchos e V. Marino, «BIM4Ren whitepaper: BIM and Renovation: Innovation for a better future,» 2022.
- [15] L. Mazzarella e L. Piterà, Efficienza Energetica attraverso la Diagnosi e il Servizio Energia negli Edifici Linee Guida, 2015.
- [16] Y. Li, S. Kubicki, A. Guerriero e Y. Rezgu, «Review of building energy performance certification schemes towards future improvement,» *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 113, 2019.
- [17] A. Androutopoulos, M. Bololia e E. Polychroni, «Energy Performance Certificates (EPCs) potential linkage with Digital Building Logbooks and Building Renovation Passports,» ePANACEA project, 2023.
- [18] P. Libório, R. Frago, C. Sousa Monteiro, J. Fernandes, E. Silva e T. Vande Castele, iBORAD The logbook data quest, ADENE – Agência para a Energia, 2018.
- [19] T. Zsolt, M. Iná, R. Neuza e V. Jonathan, Technical specifications of energy performance certificates data handling: understanding the value of data, BPIE, 2020.
- [20] G. Salvalai, M. M. Sesana e S. Ligier, «D2.6 – ALDREN Methodology note on rendering of the collected data and results in a building renovation passport,» 2019.
- [21] B. Dong, K. Lam, Y. Huang e G. Dobbs, «A comparative study of the IFC and gbXML informational infrastructures for data exchange in computational design support

environments,» *IBPSA 2007 - International Building Performance Simulation Association 2007*, vol. 3, pp. 1530-1537, 2007.

- [22] M. M. Sesana, G. Salvalai, N. D. Valle, G. Melica e P. Bertoldi, «Towards harmonising energy performance certificate indicators in Europe,» *Journal of Building Engineering*, vol. 95, 2024.
- [23] W3C, «Extensible Markup Language (XML) 1.1 (Second Edition),» *W3C Recommendation*, 2006.
- [24] M. Meneghello, «XML (extensible Markup Language)—The New Language of Data Exchange,» *Cartography*, vol. 30, n. 1, p. 51–57, 2001.
- [25] I. E. N. Maia, N. J. Themeßl e L. Kranz, Description of current Energy Performance Certificates (EPCs) related policy framework in implementing countries, ePANACEA project, 2021.
- [26] G. Costa e Á. Sicilia, «Comprehensive analysis of data storage in the participating countries,» TIMEPAC, 2022.
- [27] N. M. Škoro, «Cost-effective and smart system monitoring for EPC,» Concerted Action EPBD, Croazia, 2021.
- [28] M. Prieler, M. Leeb e T. Reiter, «Characteristics of a database for energy performance certificates,» *ScienceDire*, vol. 132, pp. 1000-1005, 2017.
- [29] G. Ruggeri, C. Maduta e G. Melica, Progress on the implementation of energy performance certificates in EU, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023.
- [30] CTI, «XML APE TRADIZIONALE (D.Lgs. 192/05 e s.m.i.),» [Online]. Available: <https://www.cti2000.eu/standard-xml/>.
- [31] M. Gómez-Gil, M. M. Sesana, G. Salvalai, A. Espinosa-Fernandez e B. López-Mesa, «The Digital Building Logbook as a gateway linked to existing national data sources: The cases of Spain and Italy,» *Journal of Building Engineering*, vol. 63, 2023.

- [32] NIBS, in *National BIM Guide for Owners*, Washington, D.C., National Institute of BUILDING SCIENCES, 2017, p. 37.
- [33] F. Triolo, «Gli Ingegneri Messinesi e la nuova tecnica BIM,» *ingenio*, 18 04 2020. [Online]. Available: <https://www.ingenio-web.it/articoli/gli-ingegneri-messinesi-e-la-nuova-tecnica-bim/>. [Consultato il giorno 12 12 2024].
- [34] V. Cattaneo e G. Grosso, «Integrare, ottimizzare, innovare: il valore del BIM nella progettazione MEP secondo Tekne,» *ingenio*, 2025.
- [35] National Institute of Building Sciences, «National Building Information Modeling Standard,» in *Version 1 - Part 1: Overview, Principles, and Methodologies*, 2007, p. 182.
- [36] building Smart, in *Guidance for Regulators*, buildingSMART® International Ltd., 2024, p. 7.
- [37] «¿Qué es OpenBIM?,» EDITECA, 11 11 2021. [Online]. Available: <https://editeca.com/que-es-openbim/>. [Consultato il giorno 12 2024].
- [38] IBIMI, «iBIMi: IFC: cos'è? e come è fatto?,» [Online]. Available: <https://www.ibimi.it/ifc-cose-e-come-e-fatto/>.
- [39] M. Carradori, «IFC – Industry Foundation Classes: un PDF per i modelli edilizi,» BIS-LAB, 26 03 2017. [Online]. Available: <https://www.bis-lab.eu/2017/03/26/ifc-industry-foundation-classes-un-pdf-per-i-modelli-edilizi/>. [Consultato il giorno 11 2024].
- [40] M. Napolitano, «IFC: cenni storici e lettura del formato aperto per il settore AEC,» blog di Archicad Italia, 21 12 2022. [Online]. Available: <https://blog.archicad.it/bim/ifc-cenni-storici-e-lettura-del-formato-aperto>. [Consultato il giorno 12 2004].
- [41] D. Gazulli, G. Lauro e V. Ranauro, «BIM e Interoperabilità: lo scambio dei dati attraverso il formato IFC per la progettazione strutturale,» *ingenio*, 4 11 2020. [Online]. Available: <https://www.ingenio-web.it/articoli/bim-e-interoperabilita-lo-scambio-dei-dati-attraverso-il-formato-ifc-per-la-progettazione-strutturale/>.
- [42] M. Napolitano, «IFC: cenni storici e lettura del formato aperto per il settore AEC,» Il blog di Archicad Italia, 21 12 2022. [Online]. Available: <https://blog.archicad.it/bim/ifc-cenni-storici-e-lettura-del-formato-aperto>.

- [43] T. Fitz, M. Theiler e K. Smarsly, «A metamodel for cyber-physical systems,» *Advanced Engineering Informatics*, vol. 41, 2019.
- [44] E. Barkmeyer e J. Lubell, «XML Representation of EXPRESS Models and Data,» 2001.
- [45] buildingSmart, «Industry Foundation Classes 4,» buildingSMART International, [Online]. Available: <https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/ADD2/HTML/>. [Consultato il giorno 1 2025].
- [46] D. Hou, I. Hassan e L. Wang, «Review on building energy model calibration by Bayesian inference,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 143, 2021.
- [47] R. J. Hitchcock e J. Wong, «Transforming IFC Architectural View BIMs for Energy Simulation: 2011,» in *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of IBPSA*, vol. 12, IBPSA, 2011.
- [48] W. Reinhard, S. Pinheiro, J. O'Donnell, S. Muhic, V. Bazjanac e T. Maile, «MVD based information exchange between BIM and building energy performance simulation,» *Automation in Construction*, vol. 90, pp. 91-103, 2018.
- [49] G. Bastos Porsani, K. Del Valle de Lersundi , A. Sánchez-Ostiz Gutiérrez e C. Fernández Bandera, «Interoperability between Building Information Modelling,» *Applied sciences*, 2021.
- [50] L. Sanhudo, N. Ramos, J. Poças Martins, R. Almeida, E. Barreira, L. Simões e V. Cardoso, «Building information modeling for energy retrofitting– A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 249-260, 2018.
- [51] Politecnico di Milano, «BIM based fast toolkit for Efficient rEnovation in Buildings,» 19 06 2019. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/820660/results>. [Consultato il giorno 1 2025].
- [52] C. Di Gregorio, «Il catasto energetico nazionale ed il deposito dell'APE per regione,» Blog Blumatica, 09 02 2023. [Online]. Available: <https://blog.blumatica.it/il-catasto-energetico-nazionale-ed-il-deposito-ape-per-regione/>. [Consultato il giorno 04 2025].

- [53] D. Enea, R. Basili, F. Fontana, F. Cignini, E. Cosimi, G. Ponzo, R. Guida, V. Tomassetti, V. D. Fatto e M. Salvato, «Il Catasto Energetico Unico regionale degli edifici e la sua contestualizzazione a una Regione pilota,» ENEA, 2023.
- [54] Agenzia del Demanio, «BIM Method Statement Process 2021,» Roma, 2021.
- [55] Agenzia del Demanio, «BIM Specifica Metodologica 2023,» Roma, 2023.
- [56] Agenzia del Demanio, «BIMMS 2023,» Roma, 2023.
- [57] IBRoad project, «Factsheet: Belgium - Flanders Current use of EPCs and potential links to iBRoad,» 2018.
- [58] E. Pifferi, «Certificazione Energetica VS Diagnosi Energetica,» 25 3 2015. [Online]. Available: <https://www.certificazione-energetica-bologna.it/certificazione-energetica-vs-diagnosi-energetica/>.

ALLEGATO A