



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

L'INTEGRAZIONE DEI DATI PER LA DIGITALIZZAZIONE DEL PATRIMONIO IMMOBILIARE IN OTTICA NZEB

DOTTORATO DI RICERCA XXXIII° CICLO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA AERONAUTICA, ELETTRICA ED
ENERGETICA – ENERGIA E AMBIENTE – UNIVERSITÀ LA SAPIENZA

Candidato: Giulia Spiridigliozzi

Matricola: 1462189

Tutor: Livio De Santoli, Sapienza

Co-Tutor: Cristina Cornaro, Tor Vergata

INDICE

CAPITOLO 1: INQUADRAMENTO DELLA RICERCA	4
1.1-Background della ricerca.....	4
1.2-Motivazione	5
1.3-Riscontro esterno.....	6
1.4-Scopo della ricerca	7
1.5-Metodo della Ricerca	7
1.6-Struttura della ricerca	9
1.7-Il progetto PRIN2015.....	10
CAPITOLO 2: STRATEGIE DI INCREMENTO DELL'EFFICIENZA ENERGETICA NEGLI EDIFICI	11
2.1-Direttive 2010/31 e 2018/844 – Aggiornamenti dell'EPBD 2002/91/ CE	12
2.2-Edifici a basso consumo energetico in Europa: stato attuale di definizione	14
2.3-Ripartizione del patrimonio costruito in Europa	18
2.4-Ripartizione del patrimonio costruito Italiano.....	23
2.4.1-Valutazione del parco immobiliare nazionale.....	23
2.4.2-Edifici ad uso residenziale	24
2.4.3-Verso l'adozione degli nZEB.....	25
2.5-Stato dell'arte delle tecnologie nZEB.....	29
2.6-I costi per le costruzioni nZEB	31
CAPITOLO 3: LO STATO DELL'ARTE DELLA MODELLAZIONE INFORMATIVA DEGLI EDIFICI	36
3.1-Stato dell'arte e definizioni del Building Information Modeling	37
3.2-La trasformazione come questione culturale	38
3.3-Il quadro normativo di riferimento.....	41
3.4-Gli standard geometrici e informativi.....	43
3.5-Le Dimensioni BIM	44
3.6-Paradigmi complementari	46
CAPITOLO 4: LA MODELLAZIONE INFORMATIVA FINALIZZATA ALL'EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI_ I CASI STUDIO	49

4.1-Interoperabilità con gli strumenti di simulazione delle performance degli edifici - lo stato dell'arte	50
4.2-I Formati di scambio.....	52
4.3-I software energetici	54
4.4-La costruzione del modello energetico.....	55
4.5-Caso Studio 1: BIM Tools Interoperability For Designing Energy-Efficient Buildings	58
4.5.1-Introduzione.....	58
4.5.2-Metodologia.....	59
4.5.3-Risultati	63
4.5.4-Conclusioni.....	66
4.6-Caso Studio 2: Testing the BIM-Ladybug tools interoperability: a daylighting simulation workflow	67
4.6.1-Introduzione.....	67
4.6.2-Metodologia.....	67
4.6.3-Risultati	71
4.6.4-Conclusione.....	77
4.7-Caso Studio 3: BIM-BEM support tools for early stages of zero-energy building design .	78
4.7.1-Introduzione.....	78
4.7.2-Metodologia.....	78
4.7.3-Risultati e discussione	82
4.7.4-Conclusioni.....	83
4.8-Considerazioni.....	84
5: IL CONTRIBUTO DEL DIGITAL TWIN PER LA DIGITALIZZAZIONE DEL PATRIMONIO	85
5.1-Background: The Smart(er) City.....	87
5.2-Il punto di partenza del Digital City e la sua integrazione con il BIM	88
5.3-Il passaggio al digitale per la sostenibilità del patrimonio culturale italiano.....	90
5.4-La condivisione aperta dati nel Cloud.....	92
CAPITOLO 6: INTEGRAZIONE DEI DATI BIM PER LE SFIDE URBANE MODERNE – IL CASO STUDIO	94
6.1-La Modellazione multiscala (5 livelli di dettaglio, LOD)	94
6.2-I Formati di scambio.....	95
6.3-Caso Studio 4.....	96

6.3.1-Introduzione.....	96
6.3.2-Metodologia.....	98
6.3.3-Risultati e discussione.....	109
6.3.4-Conclusioni.....	111
CAPITOLO 7: L'UTILIZZO DEGLI SMART ENERGY SYSTEMS NEGLI EDIFICI_IL CASO STUDIO COMPLESSO.....	113
7.1-Smart Energy Systems.....	113
7.2-Caso Studio 5: Dynamic Simulation Model of Trans-Critical Carbon Dioxide Heat Pump Application for Boosting Low Temperature Distribution Networks in Dwellings.....	118
7.2.1-Introduzione.....	120
7.2.2-Metodologia.....	121
7.2.3-Risultati e discussioni.....	134
7.2.4-Conclusioni.....	140
CAPITOLO 8: CONCLUSIONI.....	142
8.1-Sviluppi Futuri.....	145
Indice delle Figure.....	156

CAPITOLO 1: INQUADRAMENTO DELLA RICERCA

1.1-Background della ricerca

La tesi di dottorato si colloca all'interno di un lavoro di ricerca realizzato nell'ambito del Progetto PRIN 2015 (Progetto di Rilevante Interesse Nazionale) che ha visto per 36 mesi la collaborazione di dodici università Italiane allo scopo di realizzare un network di ricerca per la riqualificazione del parco edilizio esistente in ottica nZEB (nearly zero energy buildings). La politica energetica dell'Unione Europea focalizza la sua attenzione al settore delle costruzioni, rivestendo un ruolo predominante nel consumo energetico e nelle emissioni di gas serra. I principali strumenti legislativi a livello dell'UE atti al miglioramento dell'efficienza energetica, sono la direttiva 2012/27/UE e la direttiva 2010/31/UE, denominata «direttiva EPBD», Energy Performance of Buildings Directive, recentemente aggiornate dall'attuale Direttiva 2018/844. L'elemento fondamentale della EPBD è rappresentato dall'introduzione della definizione di edificio a energia quasi zero (nZEB) utilizzato per definire un edificio il cui consumo energetico è quasi nullo. Secondo l'attuale regolamento, gli Stati devono dotarsi di piani nazionali destinati ad estendere il numero degli nZEB Building adottando incentivi per la trasformazione del parco edilizio esistente. Gli studi, le sperimentazioni e i progetti pilota di edifici ad alta efficienza energetica sono importanti al fine di accelerare i processi verso la realizzazione di edifici autosufficienti, fornendo esempi ed esperienze pratiche sulle prestazioni, le tecnologie, i costi, e dove possibile le esperienze degli utenti. L'adozione di sistemi ibridi di energia in grado di combinare combustibili fossili con fonti di energia rinnovabile è considerata una valida soluzione per il risparmio di energia primaria negli edifici. Sulla scia del contesto energetico, la ricerca si inserisce in un quadro procedurale in corso di sviluppo nei ultimi anni, identificato come Building Information Modelling (BIM), che implica una gestione informativa e una digitalizzazione automatica dell'edificio. La pubblicazione della UNI 11337 avvenuta nel gennaio del 2017, e la serie ISO 19650 avvenuta nel mese di dicembre 2018, stabiliscono i primi passi da rispettare per supportare tutte le parti nel raggiungimento dei propri obiettivi qualitativi ed economici, fissando l'obbligo di utilizzo del BIM per le opere pubbliche e private. Il tema prevede un insieme di tecnologie, processi e politiche che consentono a più parti interessate di progettare, costruire e gestire in modo collaborativo un immobile. Sono numerose le sfide attribuite all'adozione di sistemi per la digitalizzazione del patrimonio costruito, sia da parte dell'industria che da parte del mondo accademico, orientando il futuro verso un'era connessa, che consente al Digital Twin (gemello digitale) di vivere, crescere e aggiornarsi in tempo reale in funzione dello stato dell'oggetto fisico, favorendo il progredire dell'IT nell'industria delle costruzioni. Gli elementi costruttivi,

dalle materie prime alle grandi metropoli sono soggette ad una rappresentazione omologa digitale (gemello digitale), che non solo ne rappresenta la forma e l'aspetto, ma ne raccoglie un notevole patrimonio di dati informativi affini, in uno scenario di informazione geo-localizzato. Pertanto, questo studio affronta diverse tematiche con spirito pragmatico, tentando di fornire spunti e soluzioni all'integrazione dei dati, con lo scopo di facilitare e razionalizzare il processo di digitalizzazione del patrimonio edilizio. Il fine ultimo è quello di fornire un supporto digitale più affidabile per lo studio e la riqualificazione degli edifici in ottica nZEB. Combinando diverse strategie di ricerca, paradigmi e metodi, questo studio:

- (1) affronta la multidisciplinarietà dei problemi;
- (2) sviluppa flussi di lavoro e strumenti che facilitano la valutazione, l'apprendimento e il miglioramento delle prestazioni energetiche con processi BIM, approcciando la sua integrazione nel sistema informativo geografico;
- (3) sviluppa modelli teorici impiantistici avanzati che contribuiscono al raggiungimento della qualifica nZEB.

1.2-Motivazione

Le recenti tecnologie consentono di raggiungere obiettivi poco esplorati, come ad esempio la catalogazione digitale degli edifici esistenti, la creazione di modelli territoriali integrati, le simulazioni dinamiche avanzate e il miglioramento delle prestazioni energetiche per il patrimonio culturale esistente. In quest'ottica, la complessità costruttiva dell'involucro edilizio e l'alto grado delle prestazioni richiesto, comporta l'applicazione di strumenti di modellazione digitale durante i processi di progettazione e di analisi simulativa. Utilizzare gli strumenti BPS (Building Performance Simulation) durante la fase iniziale di progettazione, assume un ruolo fondamentale per contribuire a migliorare le prestazioni degli edifici e ottenere la qualifica nZEB. In questo contesto, la tecnologia BIM offre la sua ampia applicazione attraverso l'uso di modelli integrati che includono in un unico database tutte le informazioni relative alla costruzione. Nondimeno, come ampiamente documentato in letteratura, mentre l'utilizzo di metodi di progettazione tradizionale porta a limitazioni procedurali, attraverso il nuovo flusso di lavoro si utilizza un'unica banca dati per lo scambio e l'integrazione delle informazioni tra i vari professionisti del settore. La multidimensionalità del processo, intesa in 7 dimensioni, comprende la classica gestione 2D e 3D del disegno, ma anche la gestione informativa 4D dei tempi, 5D dei costi, 6D del Facility Management e 7D della sostenibilità. Pertanto, l'implementazione del BIM 7D può fornire una significativa ottimizzazione del processo progettuale e dello sviluppo degli aspetti energetici al fine di migliorare le caratteristiche prestazionali dell'edificio. Inoltre, i Digital Twin (gemelli

digitali) sono prodotti in grado di fornire strumenti di simulazione e indicazione real-time sullo stato dell'oggetto costruito, come ad esempio sui sistemi impiantistici o l'insieme dei sotto servizi, mostrando come l'efficienza venga influenzata dal continuo utilizzo e dal tempo. È possibile, ad esempio, collegare al Digital Twin parametri di tipo energetico in modo da monitorare il consumo di energia, i relativi costi e le possibili misure volte alla loro ottimizzazione. O ancora, tali possibilità di monitoraggio possono trovare applicazione nella gestione delle infrastrutture o, su scala ancora più ampia, di intere aree urbane. La rappresentazione omologa digitale, che racchiude l'aspetto e il notevole patrimonio di dati informativi affini all'oggetto digitalizzato, trova il suo punto di contatto con il BIM. In sintesi, questa ricerca trae la sua motivazione dal fatto che l'industria delle costruzioni AEC (architettura, ingegneria e costruzione) è sotto pressione per migliorare le pratiche che causano inefficienze sul settore immobiliare, dalla pianificazione, alla stessa necessità di gestione dell'edificio durante tutto il suo ciclo di vita. Pertanto, la ricerca si sviluppa integrando gli attuali temi di sostenibilità e digitalizzazione dei processi, molto sentiti sia a livello nazionale che internazionale.

1.3-Riscontro esterno

Mentre il risparmio energetico e la progettazione nZEB sono temi ormai consolidati e ampiamente accettati e condivisi da tutti, i recenti concetti di Building Information Modeling stentano ancora a diffondersi tra la collettività. Infatti, come di norma accade durante un cambiamento, il processo di "passaggio" riscontra sfiducia e perplessità, rendendo la trasformazione lenta e ostacolata. Il mondo lavorativo e il mondo accademico si stanno attivando sul fronte della ricerca per dare risposte a procedure ancora sconosciute, sviluppando algoritmi e integrando nuovi formati di interscambio aperti. Trovandoci in un'epoca di transizione esistono posizioni diverse, c'è chi ritiene le procedure BIM indispensabili, chi resta legato ai processi tradizionali, e per ultimo chi cerca di posticipare il cambiamento. La realtà è che non ci troviamo né in un fenomeno temporale, né in una tendenza del momento, bensì, in un vero e proprio cambio di paradigma, paragonabile solo all'unica precedente trasformazione vissuta, quella del passaggio dalla carta ai sistemi automatici computerizzati. Le recenti normative, gli obblighi e gli adempimenti emanati mostrano la prova tangibile del cambiamento in atto. Il tema solleva numerosi interrogativi come gli impegni economici, le risorse necessarie per l'adozione del flusso digitalizzato, la risposta dei mercati, i vantaggi dell'investimento, richiedendo esempi pratici e studi fondati. Nel dettaglio energetico, i quesiti riguardano l'integrazione della procedura inserita in un contesto di sostenibilità, di validazione e veridicità delle analisi di simulazione. A queste domande numerose case software provano a dare risposta, implementando e offrendo strumenti, piattaforme,

plug-in, forum e servizi di supporto. In questo contesto la mia tesi ha trovato fondamento.

1.4-Scopo della ricerca

Offrendo con la digitalizzazione del processo la possibilità di sovrapporre informazioni multidisciplinari di architettura, materiali, impianti, sostenibilità e contesto geo-spaziale, lo scopo della tesi è di dimostrare le possibilità offerte dall'innovazione tecnologica del digitale nel campo della sostenibilità energetica. La creazione, la manipolazione e l'analisi dei dati, rappresentano una sfida da affrontare per far fronte ai cambiamenti di innovazione tecnologica in corso. Tra questi, si riscontra il processo di trasformazione del costruito per mezzo di sistemi basati su applicazioni di Information Modeling, il quale permette di ridurre l'impronta di carbonio, offrendo la possibilità di gestire totalmente i "contenuti energetici" dell'edilizia. Nel presente elaborato si vuole dimostrare l'efficacia in termini di trasparenza del dato proveniente da una modellazione parametrica BIM, fino alla simulazione in un software energetico, la successiva gestione del dato in un database PostgreSQL, e la visualizzazione semplificata in un sistema geo referenziato Cesium. La ricerca è stata portata avanti su tre casi applicativi di differente entità, il caso Test (base) per l'approccio al tema, il caso semplice per la verifica della procedura e il caso complesso, dotato di sistema impiantistico avanzato. L'impianto ibrido investigato all'interno dell'ultimo caso studio contribuisce a sostenere l'approccio orientato alla riduzione delle emissioni di CO² e al risparmio in termini di energia primaria, il quale, unito alle nuove tecnologie procedurali contribuisce al raggiungimento di un futuro più sostenibile e autosufficiente.

1.5-Metodo della Ricerca

Per dimostrare le possibilità offerte dall'innovazione del digitale nel campo della sostenibilità sono state considerate due tipi di analisi, la simulazione energetica e di illuminamento, e due formati di interscambio, il file gbxml e il file IFC. Alla fine di questa prima fase sono state valutate le risposte sia dal punto di vista di trasmissione del dato che di validità delle simulazioni. Successivamente, i dati geometrici sono stati referenziati in un sistema geo-spaziale e, insieme alle informazioni energetiche, sono stati ospitati e manipolati all'interno di un Database gestionale in grado di archiviare le fonti e interrogarle per mezzo di servizi WEB. La figura 1 riporta lo schema del flusso di lavoro seguito nel corso della ricerca, le cui fasi sono state ordinate seguendo la numerazione.

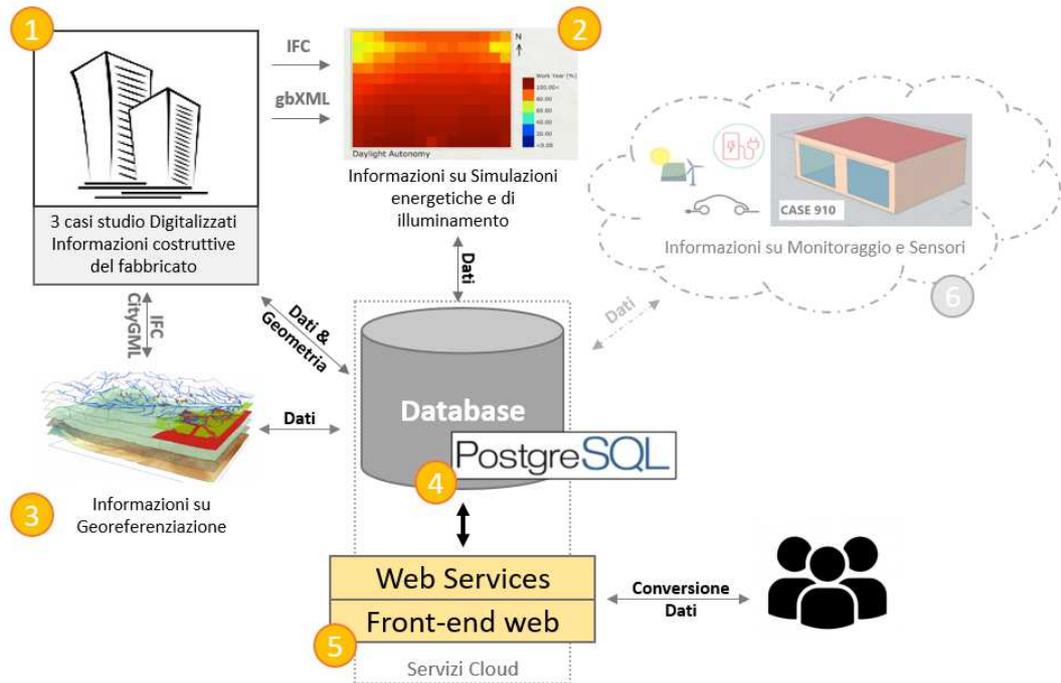


Figura 1: Schema Workflow della ricerca

Il punto 1 rappresenta la prima fase della ricerca in cui sono stati digitalizzati i 3 casi di studio all'interno di Revit, il caso Test, il caso semplice e il caso complesso. Per mezzo di esportazioni in formato file IFC e gbXML, e grazie all'ausilio di strumenti middleware intermedi, i modelli energetici sono stati importati all'interno di strumenti di simulazione quali IDA-ICE per l'analisi energetica e Honeybee con motore EnergyPlus per l'analisi di illuminamento (punto 2). Una volta generati i dati geometrici ed energetici, questi sono stati geo referenziati grazie all'integrazione dei sistemi BIM al GIS, per mezzo di trasformazione delle informazioni in formato file CityGML (punto 3). La totalità delle informazioni ottenute è stata quindi importata all'interno di un Database SQL in grado di archiviare e unire le informazioni evitando ridondanze ed errori (punto 4). Infine, è stato utilizzato un sistema web service e front-end web per rendere i dati disponibili e comprensibili anche all'utente finale (punto 5). Il punto 6, in trasparenza, rappresenta una delle possibili integrazioni che permetterebbero di completare la trasformazione del modello virtuale in un effettivo gemello digitale integrandolo al mondo reale. Il sistema complessivo è costituito da risorse fisiche reali, modelli virtuali, simulazioni e algoritmi, interfacciati con servizi basati su Cloud. Ogni servizio è ospitato in modo indipendente nel Web e comunica con gli altri moduli tramite chiamate API (Application Programming Interface), che rappresenta la componente strategica della Digital Transformation. Le chiamate API sono interrogazioni specifiche dei dati che permettono di semplificare il dialogo tra un'applicazione e un'altra evitando ridondanze.

1.6-Struttura della ricerca

La tesi riflette le fasi di ricerca affrontate nel corso dei tre anni, raggruppando obiettivi, metodi e risultati ottenuti. Successivamente al presente Capitolo 1, l'elaborato è così strutturato:

Il *Capitolo 2* esamina la letteratura sui concetti generali legati alla sostenibilità e agli edifici autosufficienti. Vengono riportate le attuali normative vigenti, i requisiti e i futuri obiettivi programmati sia in ambito nazionale che internazionale, sui temi nZEB. Il capitolo rappresenta la cornice all'interno del quale la mia tesi si inserisce.

Il *Capitolo 3* si occupa di esporre i concetti legati all'utilizzo delle nuove tecnologie al fine ottimizzare i flussi di processo. Nel dettaglio riporta una raccolta bibliografica sul BIM, i suoi impieghi, i vantaggi, le normative di riferimento e la sua diffusione mondiale.

Il *Capitolo 4* si focalizza sull'impiego di tali procedure in campo energetico, descrivendo l'Energy Modeling, i formati di interscambio e l'interoperabilità tra i diversi strumenti presenti sul mercato. All'interno di questo capitolo sono descritti due dei casi studio affrontati, il caso Test e il caso semplice, con le relative simulazioni e risultati ottenuti, sia in ambito energetico che di illuminazione diurna. Infine, sono state tratte delle conclusioni complessive che riguardano il processo di trasmissione delle informazioni dai sistemi di Information Modeling a quelli di Energy Modeling.

Il *Capitolo 5* inquadra come i sistemi digitalizzati BIM possano rappresentare la base di dati necessaria allo sviluppo del Digital Twin, la partenza per raggiungere il punto di connessione con l'opera in esercizio, integrandosi in un contesto geo-spaziale.

Il *Capitolo 6* riporta la descrizione di un'applicazione pratica di inserimento di dati ricavati attraverso la tecnologia BIM in un database PostgreSQL con sistema informativo geografico (GIS).

Il *Capitolo 7*, focalizza l'attenzione sul terzo caso studio, ovvero il caso complesso. Quest'ultimo, anche se geometricamente digitalizzato in precedenza è stato esplicitato nella parte finale perché racchiude in sé l'investigazione dell'impiego degli Smart Energy System in un fabbricato. Il progetto vede l'utilizzo di quattro pompe di calore a CO₂ transcritica disposte in 4 villette unifamiliari posizionate all'interno di un singolo lotto, dotate inoltre di pannelli fotovoltaici e cogeneratore per la produzione di acqua calda sanitaria ed elettricità a sostegno delle pompe di calore. Tale layout è stato confrontato con quello tradizionale basato su sistemi di generazione separati utilizzando diversi indicatori di prestazione energetica. Inoltre, è stata effettuata un'analisi di sensibilità sul risparmio di energia primaria, sui consumi di energia fossile primaria e sulla frazione di energia rinnovabile.

1.7-Il progetto PRIN2015

La ricerca ha avuto corso all'interno del progetto finanziato PRIN2015 della durata di tre anni. Gli obiettivi principali sono stati finalizzati al raggiungimento di un nuovo modello energetico per il settore edilizio, attraverso l'ausilio di soluzioni innovative ed integrate per una trasformazione tecnico-economica degli edifici esistenti in nZEB. A questo scopo, si è operato attraverso una rete composta da 12 università, tutti impegnati sul tema dell'efficienza energetica in edilizia, con collegamenti nazionali ed internazionali. Nel dettaglio il progetto ha visto la partecipazione delle seguenti università: UniRoma 1 come Coordinamento scientifico, UniRoma 2, UniCassino, Uni Cagliari, IUAV, UniCAL-Cosenza, UniSa, UniNa, PoliTo, Roma 3, raggruppate in 6 unità operative. Una stretta partecipazione è sorta inoltre con i più importanti enti di ricerca e associazioni quali l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) e l'Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento, Refrigerazione AICARR. In sintesi, l'obiettivo principale del progetto di ricerca è stato quello di:

- Trovare soluzioni tecnologiche innovative al fine di raggiungere la massima efficienza energetica;
- Trovare metodi efficaci per garantire la riduzione dei consumi negli edifici esistenti, residenziali e non residenziali;
- Incrementare il numero di edifici nZEB;
- Ottenere la massima valorizzazione energetica con l'impiego di risorse finanziarie ottimali;
- Potenziare reti intelligenti;
- Intervenire sulla mobilità collettiva sostenibile;
- Formare e valorizzare il bacino occupazionale legato all'energia sostenibile.

Obiettivo ultimo è stato quindi quello di fornire un modello replicabile per la riqualificazione dell'esistente, nonché per l'esecuzione degli interventi scelti e per la successiva fase di gestione e monitoraggio. Lo studio è stato possibile grazie allo sviluppo di modelli di simulazione dinamica, in grado di fornire dettagli sui criteri per la progettazione e le soluzioni più idonee per l'involucro edilizio e per i sistemi energetici. I compiti sono stati divisi e affrontati dalle diverse università italiane le quali hanno sviluppato modelli di simulazione, applicandoli a casi studi differenti ottenendo e sommarizzando una serie di risultati e pratiche di lavoro ottimali. I risultati ottenuti dalle unità operative hanno permesso di ottenere una raccolta di oltre 100 pubblicazioni scientifiche, inoltre raggruppate in un unico testo formato libro, in corso di pubblicazione. La presente tesi di dottorato è stata redatta all'interno dell'unità operativa 1, che vede la collaborazione dell'università di Roma La Sapienza e L'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata".

CAPITOLO 2: STRATEGIE DI INCREMENTO DELL'EFFICIENZA ENERGETICA NEGLI EDIFICI

L'Unione europea (UE) mira ad una drastica riduzione delle emissioni di gas serra (GHG), principale problematica del surriscaldamento climatico. Tra le principali strategie per il miglioramento dell'efficienza energetica troviamo uno degli obiettivi della proposta decennale chiamata "Europa 2020". I 5 focus preposti entro il 2020 consistono nell'innalzamento occupazionale del 75%, l'aumento di finanziamenti per la ricerca, il miglioramento dell'istruzione scolastica, la lotta alla povertà e in particolare sull'aspetto energetico, il così detto obiettivo 20-20-20. Quest'ultimo prevede la riduzione del 20% dei gas serra rispetto al 1990, l'aumento del 20% di fonti rinnovabili e del 20% dell'efficienza energetica [1]. Nell'Unione europea (UE) il settore dell'edilizia è responsabile di circa il 40% del consumo totale di energia finale, mentre il 36% delle emissioni globali di CO₂ in Europa è imputabile agli edifici esistenti. [2] Il primo strumento legislativo volto a migliorare il rendimento energetico degli edifici è la "Direttiva sul rendimento energetico nell'edilizia (EPBD) introdotta nel 2002 e aggiornata negli anni 2010 e 2018. [2,3] A seguire, la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica riporta le disposizioni relative alla ristrutturazione degli edifici e le strategie a lungo termine per la mobilitazione di investimenti sul parco immobiliare nazionale [4]. In termini concreti, ciò significa ridurre il consumo finale di energia dell'UE a non più di 1.086 milioni di tonnellate di petrolio equivalente (Mtep) e il consumo di energia primaria a non più di 1.483 Mtep, equiparabile allo spegnimento di circa 400 centrali elettriche [4,5]. A tal fine, ai paesi dell'UE è stato richiesto di fissare i propri obiettivi di efficienza energetica, pubblicare piani d'azione nazionali triennali (NEEAP), e infine, diffondere le relazioni annuali sui programmi di avanzamento [5]. La direttiva EPBD afferma che tutti i nuovi edifici costruiti all'interno dell'Unione Europea devono raggiungere livelli di energia quasi nulli garantendo prestazioni energetiche elevate, ed inoltre; i loro bassi fabbisogni energetici devono essere coperti in maniera significativa da fonti di energia rinnovabile [2,3]. Considerando la varietà delle culture sull'edilizia in Europa, la nuova direttiva impone agli Stati membri di elaborare definizioni e tabelle di marcia verso l'impiego di edifici a energia quasi zero, riflettendo le specifiche condizioni nazionali [3]. Più di un quarto del patrimonio edilizio del 2050 deve ancora essere costruito, di conseguenza, sono necessari degli sforzi per sostenere l'effettiva attuazione di edifici a basso consumo energetico, fornendo orientamenti, principi comuni e controlli di qualità[6]. Una solida definizione di paese sostenibile, unito, alle norme dell'UE a supporto della corretta attuazione della direttiva, sono fondamentali per la realizzazione di edifici quasi auto-sostenibili. Il passaggio verso edifici a bassissima energia genera una profonda trasformazione del settore delle costruzioni e produce

inoltre una crescita importante sul mercato di nuove tecnologie efficienti. Tale potenziamento presenta un importante incremento occupazionale implicando nuovi posti di lavoro indotti in tutta Europa. Oltre alle raccomandazioni per le nuove costruzioni, l'EPBD sottolinea anche la necessità del rinnovamento del parco immobiliare esistente e il miglioramento delle sue prestazioni energetiche, il quale svolge un ruolo chiave nell'aumento dell'efficienza energetica europea. Alcune stime dimostrano che il tasso medio annuo per la costruzione di nuove abitazioni negli Stati membri dell'UE e il tasso di sostituzione è dello stock esistente è di circa l'1%. La stima stabilisce che solo il 25% degli edifici che esisteranno nel 2050 non è già stato costruito, ciò significa che il 75% degli stock futuri è già stato costruito per cui diventa fondamentale concentrarsi sul restauro energetico del parco edilizio esistente. [6] Attualmente, circa il 35% degli edifici dell'UE ha più di 50 anni e quasi il 75% del patrimonio edilizio è inefficiente dal punto di vista energetico. Il rinnovo di edifici esistenti può portare a significativi risparmi energetici, in quanto potrebbe ridurre il consumo totale di energia dell'UE del 5-6% e ridurre le emissioni di CO₂ di circa il 5%. Gli investimenti nell'efficienza energetica stimolano l'economia, in particolare l'industria delle costruzioni, che genera circa il 9% del PIL europeo e rappresenta direttamente 18 milioni di posti di lavoro diretti. Le PMI, in particolare, beneficiano di un mercato di rinnovamento potenziato, poiché contribuiscono per oltre il 70% del valore aggiunto nel settore dell'edilizia dell'UE. [5]

2.1-Direttive 2010/31 e 2018/844 – Aggiornamenti dell'EPBD 2002/91/ CE

La direttiva sul rendimento energetico nell'edilizia (EPBD, 2002/91/ CE) è stato il primo grande tentativo che impone a tutti gli Stati membri di introdurre un quadro generale per la definizione dei requisiti del codice energetico in base a un approccio basato sull'intero edificio. Gli Stati membri dovevano introdurre una metodologia a livello nazionale o regionale per calcolare le prestazioni energetiche degli edifici e applicare requisiti minimi sulle prestazioni per gli edifici nuovi ed esistenti soggetti a importanti lavori di ristrutturazione. Pertanto, a seguito dell'EPBD nel 2002, i requisiti hanno gradualmente iniziato a passare da un approccio prescrittivo a un approccio prestazionale, che è considerato un grande cambiamento nelle tendenze del codice edilizio. Importanti trasformazioni stanno avendo corso anche attraverso l'applicazione del concetto di ottimizzazione dei costi nei requisiti di prestazione energetica introdotti dalla rifusione dell'EPBD nel 2010 (2010/31/UE). L'aggiornamento del 2010 sul rendimento energetico nell'articolo 9 introduce la definizione di "edifici a energia quasi zero" (nZEB), come requisito futuro da attuare dal 2019 in poi per edifici pubblici e dal 2021 in poi per tutti i nuovi edifici. L'EPBD definisce un edificio a energia quasi zero come segue: ["Un edificio che ha un rendimento energetico molto elevato ... [2]. La quantità

quasi zero o molto bassa di energia richiesta deve essere coperta in misura significativa da fonti di energia rinnovabile, compresa l'energia rinnovabile prodotta in loco o nelle vicinanze. "] [2] I punti salienti includono:

- Ciascun Stato membro deve sviluppare e adottare nuove politiche al fine di stimolare la trasformazione degli edifici ristrutturati in edifici a bassissimo consumo energetico.
- La soglia di 1000 m² per importanti ristrutturazioni, presente nella prima edizione del documento, è stata eliminata.
- Viene richiesta una procedura più dettagliata e rigorosa per il rilascio del documento di prestazione energetica, richiedendo nuovi sistemi di controllo per la verifica del certificato.
- Gli Stati membri devono introdurre sanzioni per inadempienza, efficaci, proporzionate e dissuasive.

L'EPBD non prescrive né un approccio uniforme per l'implementazione di edifici a basso consumo, né una metodologia di calcolo per il bilancio energetico. Infatti, per aggiungere flessibilità al raggiungimento degli obiettivi, ciascun Stato membro elabora il proprio piano nazionale al fine di aumentare il numero degli edifici nZEB. Tali piani, traducono il concetto di edificio a energia quasi zero in misure e definizioni pratiche, applicabili a livello nazionale. La flessibilità proposta dalla direttiva ha lasciato però anche spazio all'interpretazione, facendo porre agli stati membri differenti domande, quali:

- Come mantenere la definizione di nZEB sufficientemente flessibile.
- Come definire ed impostare correttamente la quota di energia rinnovabile.
- Come determinare l'equilibrio ottimale tra efficienza energetica ed energia rinnovabile.
- Come collegare la definizione di nZEB ai principi di ottimizzazione dei costi al fine di avere convergenza e continuità.

Le direttive sulla prestazione energetica nell'edilizia (2010/31/UE) e sull'efficienza energetica (2012/27/UE), sono state quindi aggiornate dalla direttiva (UE) 2018/844, entrata in vigore il 9 luglio 2018. A questo proposito, la nuova direttiva 2018/844 conferma tutti gli adempimenti previsti all'interno della precedente introducendo però obblighi più severi e chiarimenti sul ruolo degli edifici. Tenendo conto del fatto che quasi il 50% del consumo dell'energia finale dell'UE è usato per riscaldamento e raffrescamento, di cui l'80% negli edifici, il conseguimento degli obiettivi energetici e climatici dell'Unione Europea è legato agli sforzi di quest'ultima per rinnovare il suo parco immobiliare [3]. Le nuove Linee guida si concentrano in particolare sulle strategie di ristrutturazione a lungo termine (SRLT), comprensive delle modalità di riciclaggio dei materiali, e sul calcolo della prestazione energetica. È noto che la popolazione passa la

maggior parte della propria esistenza all'interno degli ambienti costruiti, pertanto questi devono essere in grado di offrire elevate condizioni di benessere interno, garantendo al contempo protezione sismica e antincendio. Anche in questo caso l'UE non entra nel merito di come ciò andrebbe ottenuto ma permette agli Stati di Membri di adempiere autonomamente in base al parco edilizio nazionale. Reduce i numerosi quesiti sorti, un'ulteriore novità è la proposta agli stati di predisporre degli sportelli "one-stop-shop", capaci di offrire consulenza integrata e accessibile, per l'efficienza energetica degli edifici. Viene inoltre suggerito un "Building Renovation Passport", ovvero un "passaporto" personalizzato sul singolo edificio, nel quale vengono riportati dettagliatamente i lavori necessari per una completa trasformazione nZEB, in un arco temporale di 15-20 anni. Gli Stati membri sono invitati a stabilire una tabella di marcia contenente le misure, gli indicatori di avanzamento interni e le tappe indicative per il 2030, il 2040 e il 2050. L'obiettivo di efficienza energetica dell'UE per il 2030 di almeno il 32,5% si traduce in un consumo finale di energia di 956 Mtep e/o un consumo di energia primaria di 1.273 Mtep nell'UE-28 [5]. Pertanto, ai sensi di questa direttiva, i paesi dell'UE dovranno ottenere nuovi risparmi energetici dello 0,8% ogni anno del consumo finale di energia per il periodo 2021-2030. Ultime novità riguardano l'inserimento di un nuovo indicatore di prestazione energetica che riguarda la predisposizione al controllo intelligente degli edifici (smart), e l'obbligo di predisporre e installare punti di ricarica per veicoli elettrici. A questo proposito, la Commissione UE seguirà con ulteriori raccomandazioni relative alla modernizzazione prevista nella Direttiva, tra cui il building automation control, la mobilità elettrica e le ispezioni. Oggi, oltre la metà degli Stati membri ha definito strategie e obiettivi a lungo termine per raggiungere standard a basso consumo energetico per le nuove costruzioni. L'aggregazione e il miglioramento dei concetti energetici esistenti sono necessari per ottenere i requisiti a energia quasi zero indicati dall'EPBD e dalla direttiva sulle energie rinnovabili.

2.2-Edifici a basso consumo energetico in Europa: stato attuale di definizione

Gli aggiornamenti della direttiva EPBD suggeriscono agli Stati membri dell'UE di approvare piani e obiettivi nazionali per promuovere l'adozione di edifici a energia quasi zero. Il presente paragrafo fornisce informazioni su definizioni e politiche degli Stati, descrivendo l'attuale stato dell'arte nel contesto Europeo. La direttiva energetica non offre una definizione globale per il raggiungimento di un edificio a basso consumo, in quanto è strettamente legato alle condizioni a contorno, ma permette agli Stati di adattarsi secondo le proprie disposizioni. In generale, un edificio a basso consumo energetico è indicato come un edificio con prestazioni energetiche migliori rispetto ai requisiti standard di costruzione. In tale contesto, per aiutare gli Stati membri ad attuare

il concetto di nZEB, sono stati sviluppati nel corso degli anni, diversi progetti con il cofinanziamento della Comunità Europea.

- Ad esempio, il progetto **ASIEPI 2007-2010** (Valutazione e miglioramento dell'impatto dell'EPBD - per nuove costruzioni e per il rinnovamento di edifici) si è posto di migliorare l'efficacia delle normative sulla prestazione energetica degli edifici [7]. Attraverso i 12 paesi coinvolti tra cui l'Italia con l'ENEA, il progetto ha ottenuto buoni risultati sulle pratiche dell'EPBD in Europa.
- Il progetto **ENTRANZE 2012-2014** (Politiche per forzare la transizione verso edifici a energia quasi zero nell'UE-27) ha supportato le procedure di elaborazione delle politiche, fornendo dati, analisi e linee guida. [8].
- Il progetto europeo **RENEW SCHOOL 2014-2017** ha dimostrato la fattibilità della ristrutturazione nZEB di edifici scolastici con elementi prefabbricati, riportando esempi di 18 scuole europee [9].
- Inoltre, ci sono stati diversi altri progetti di **Intelligent Energy Europe (IEE)** che si sono concentrati sugli nZEB a partire dal 2012 [10], e numerose ricerche e progetti pilota che hanno testimoniato l'interesse della comunità internazionale su questo argomento [11-16]
- I progetti europei finanziati dal programma H2020 a partecipazione italiana tuttora in corso sono: **CON-ZEBs** [17], **CRAVEzero** [18] e **A-ZEB** [19].
- Il più recente **ZEBRA2020** [20] è stato lanciato alla fine di aprile 2014 a Vienna e ha monitorato la diffusione sul mercato di edifici a basso consumo energetico in tutta Europa, generando dati e prove per la valutazione e l'ottimizzazione delle politiche interne. I partner del progetto hanno sfruttato i dati e le conoscenze provenienti dal settore edile europeo e dal mondo accademico sulle migliori pratiche nZEB fino al 2030. L'obiettivo del progetto è stato quello di assistere i responsabili politici a livello dell'UE e degli Stati membri, le agenzie energetiche e le varie parti interessate nel settore edilizio europeo per sviluppare i quadri di impatto nel mercato.

Nonostante il supporto delle diverse iniziative contestuali alle emanazioni delle direttive, numerosi paesi hanno riscontrato problematiche nell'attuare le misure adeguate: alla fine del 2012 solo otto Stati membri dell'UE (BE, DK, CY, FI, LT, NL, SE e UK) avevano fornito i loro piani nazionali e alla metà del 2013 sono stati aggiunti solo altri sei Stati membri (BG, DE, FR, HU, IE e SK). Attualmente, sul sito della commissione europea troviamo tutti i piani presentati nel periodo 2011-2018, delineando come e quando, i paesi si stanno muovendo per aumentare il numero di edifici nZEB. [21]. Questo dimostra che la commissione europea sta seguendo da vicino i progressi compiuti dagli Stati membri, sviluppando al contempo relazioni documentali sugli stati di avanzamenti e sui progressi ottenuti. Ad esempio, la relazione della Commissione (**COM (2013) 483**) "Progressi realizzati dagli Stati membri in materia di edifici a energia

quasi zero” [22] ha rilevato che i paesi dell'UE devono intensificare notevolmente gli sforzi per trarre vantaggio dalle opportunità offerte dagli nZEB. In tale rapporto, pubblicato nel 2013, viene specificatamente riportata la conclusione che “gli Stati membri hanno compiuto scarsi progressi nella loro preparazione alla realizzazione di edifici a energia quasi zero entro il 2020”. Tale anticipazione ha dimostrato l’inadeguata preparazione da parte degli Stati membri di adempiere e rispettare i termini prescritti al raggiungimento degli obiettivi sostenibili. In favore di tali previsioni, nel 2016 la Commissione ha sviluppato **linee guida** [23] per la promozione di edifici a energia quasi zero al fine di garantire che entro il 2020 tutti i nuovi edifici potessero raggiungere gli obiettivi previsti. Nello stesso anno, è stata preparata anche una **relazione di sintesi sui piani nazionali emanati** [24]. Nel 2018, vengono ulteriormente trattati i piani nel forum EPBD Concerted Action (**CA EPBD**) in cui viene fornita una panoramica delle applicazioni nazionali al concetto nZEB [25]. CA EPBD è un'iniziativa congiunta tra gli Stati membri dell'UE e la Commissione europea che coinvolge i rappresentanti dei ministeri nazionali per la direttiva sul rendimento energetico nell'edilizia in ciascuno Stato membro dell'UE. L'obiettivo è quello di migliorare la condivisione delle informazioni e le differenti esperienze per l'adozione della direttiva. La prima CA EPBD è stata lanciata nel 2005 e si è conclusa nel giugno 2007. Una seconda fase è seguita immediatamente dopo la prima CA EPBD, una terza fase si è svolta dal 2011 al 2015 e una quarta da ottobre 2015 a marzo 2018. L'attuale quinta fase è iniziata il 10 maggio 2018 e durerà fino al 30 aprile 2022 e mira a recepire e attuare la direttiva modificata EPBD 2018/844/UE. L'EPBD della CA ha ricevuto finanziamenti dal programma di ricerca e innovazione di Horizon 2020 dell'Unione europea. Gli obiettivi specifici sono:

1. Migliorare e strutturare la condivisione di informazioni ed esperienze derivanti dall'attuazione nazionale e promuovere le buone pratiche nelle attività richieste agli Stati membri per l'attuazione della direttiva sul rendimento energetico nell'edilizia (EPBD).
2. Creare condizioni favorevoli per una più rapida convergenza delle procedure nazionali in materia di EPBD.
3. Sviluppare un collegamento diretto con le altre due azioni concertate relative agli edifici stabilite nell'ambito del programma IEE: la CA-RES, incentrata sul recepimento e l'attuazione della direttiva sui sistemi di energia rinnovabile (DIRETTIVA 2009/28 / CE); e il CA-EED, incentrato sul recepimento e sull'attuazione della direttiva sull'efficienza energetica (DIRETTIVA 2012/27 / UE) e sulle loro prossime revisioni.
4. Completare il lavoro del comitato dell'articolo 26 e di eventuali gruppi ad hoc sulle norme EPB del CEN (Comitato europeo di normalizzazione) e sulle esercitazioni di certificazione.

5. Stabilire un dialogo con il CEN nell'attuazione delle norme di seconda generazione per sostenere l'attuazione dell'EPBD.
6. Sostegno agli Stati membri europei e alla Norvegia per utilizzare i piani energetici nazionali per comunicare i progressi nell'attuazione dell'EPBD.

All'interno del Report troviamo una sintesi sullo stato attuale degli stati UE. Infine, nel 2019 è stato preparato uno studio esaustivo su ciascuno Stato, inerente all'edificazione e alla ristrutturazione energetica, per l'adozione di edifici a energia quasi zero dal 2012 al 2016, applicando indicatori in linea con l'Osservatorio degli edifici (BSO). [26]. All'interno del documento, vengono riportati i risultati per ciascuno dei 28 Stati membri aggiornati al recente 2019 (pre-BREXIT), sintetizzati come:

- Definizioni precise nel contesto del rinnovamento energetico degli edifici
- Inventario delle costruzioni esistenti nell'UE28 e dati sulle nuove costruzioni
- Tassi di rinnovo e costi di investimento; suddiviso in rinnovamento energetico, rinnovamento non energetico, edifici residenziali e non residenziali e profondità di rinnovo
- Relativi risparmi di energia primaria; suddiviso in edifici residenziali e non residenziali e diverse profondità di ristrutturazione
- Evitare le emissioni di gas serra attraverso il rinnovamento energetico; suddiviso in edifici residenziali e non residenziali
- Impatto sul tasso di occupazione della ristrutturazione generale degli edifici
- Tassi per l'adozione di NZEB; diviso in nuova costruzione e ristrutturazione
- Informazioni su trigger, driver, barriere e incentivi.

Al fine di ottenere i dati primari sulle attività di rinnovo dell'energia e sull'adozione della nZEB negli Stati membri dell'UE-28, sono state condotte tre tipi di indagini:

- L'indagine online su larga scala dei consumatori (30.118 intervistati nell'UE-28, 18.302 rinnovatori di energia) un campione composto da tre gruppi principali; proprietari, inquilini e proprietari.
- Il sondaggio online dell'architetto (1.581 intervistati nell'UE-28) si è concentrato sia su edifici residenziali che non residenziali.
- Il sondaggio telefonico dell'appaltatore principale e dell'installatore (2.009 intervistati nell'UE-28) è stato adattato al lato dell'offerta. Questo sondaggio si è concentrato su progetti di ristrutturazione residenziale e non residenziale e NZEB.

Una profonda ristrutturazione "una tantum" è considerata particolarmente significativa nelle discussioni per la de-carbonizzazione del parco edilizio. Tuttavia, con il tasso stimato solo dello 0,2% - 0,3% in termini di superficie interessata, i lavori necessari intesi come ristrutturazione profonda avvengono solo sporadicamente. Il tasso di rinnovo ponderato dell'energia è calcolato in circa l'1%. In questo senso, se tale percentuale persiste, il settore dell'edilizia non riuscirà a contribuire nella necessaria riduzione

dell'energia primaria e di conseguenza nella riduzione delle emissioni di gas serra, per questo è richiesta un'accelerazione significativa. Dal progetto ZEBRA2020 è stata estrapolata una mappa dello stato attuale di definizione degli nZEB negli Stati membri, figura 2 [27].

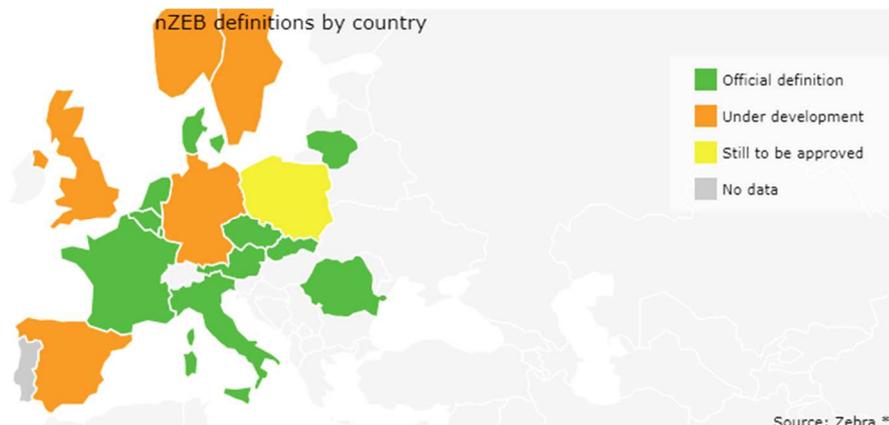


Figura 2: Livello di definizione degli NZEB negli Stati membri – Fonte Progetto ZEBRA2020 [20]

Gli obiettivi a energia quasi zero rappresentano quindi la strada verso un patrimonio edilizio de-carbonizzato, sia nelle ristrutturazioni che nelle nuove costruzioni, seguendo procedure e parametri differenti. Circa il 40% degli Stati membri non ha ancora una definizione approfondita di nZEB. Il 60% invece, ha presentato la propria definizione dettagliata in un documento legale, sottolineando che tale definizione potrebbe essere aggiornata in un secondo momento. Di conseguenza, non è possibile confrontare con precisione il livello di ambizione delle definizioni nazionali nZEB a causa dei diversi indicatori, delle metodologie di calcolo e dei fattori di energia primaria applicati. In linea generale, è richiesta una riduzione del consumo di energia del 30 - 50% per i nuovi edifici, che corrisponderebbe generalmente a una domanda di 30-60 kWh/m²anno nei paesi dell'Europa centrale. Date le diverse condizioni climatiche e normative in tutta Europa, è difficile definire esattamente il concetto di edificio a basso consumo energetico per l'intera UE. Gli standard e le metodologie nazionali variano in modo tale che gli sviluppi della "bassa energia" in un paese potrebbero non soddisfare le "pratiche normali" in un altro.

2.3-Ripartizione del patrimonio costruito in Europa

Gli edifici rivestono un ruolo chiave per la nostra esistenza, tuttavia, le prestazioni energetiche sono generalmente così scarse che i livelli di energia consumati collocano il settore delle costruzioni tra le fonti di emissioni di CO₂ più significative in Europa. Come esposto nei paragrafi precedenti, gli edifici ad alta efficienza energetica rivestono un ruolo fondamentale per un futuro sostenibile, offrendo notevoli benefici. La riduzione della domanda di energia richiede l'implementazione di politiche efficaci che a loro volta

rendono necessario capire le influenze sui processi decisionali delle persone, le caratteristiche chiave del patrimonio edilizio e l'impatto delle politiche attuali. Su questa linea, mentre i nuovi edifici potrebbero essere costruiti con elevati livelli prestazionali, sono però gli edifici esistenti a rappresentare la grande maggioranza del patrimonio edilizio, necessitando pertanto, di profondi lavori di ristrutturazione. In questo paragrafo è riportata l'attuale densità abitativa degli Stati membri dell'Unione Europea (figura 3) e le recenti condizioni sul patrimonio costruito residenziale e non. I tassi di crescita annua nel settore residenziale sono circa dell'1%, mentre la maggior parte dei paesi ha registrato una riduzione del tasso di nuove costruzioni negli ultimi anni, riflettendo l'impatto dell'attuale crisi finanziaria sul settore delle costruzioni.

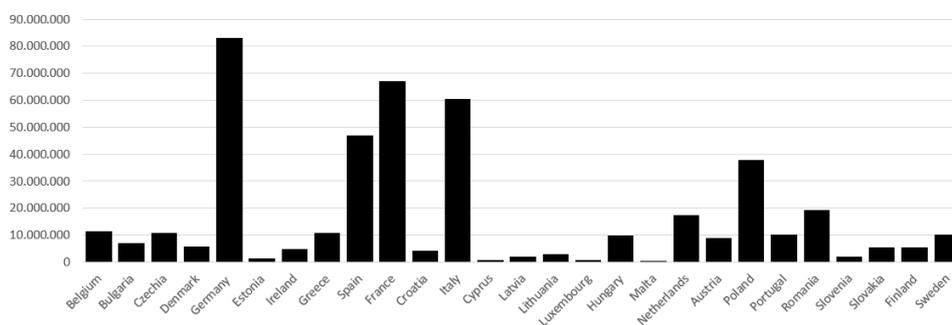


Figura 3: Popolazione al 1 gennaio 2020 – Fonte dati ISTAT

In Europa, gli edifici non-residenziali rappresentano circa il 25% dello stock totale degli edifici e comprendono un settore più complesso ed eterogeneo rispetto a quello residenziale figura 4. Nell'immagine, la quota di non residenziale è calcolata sulla metratura totale dell'edificio in base alle formule: $\text{Condivisione superficie coperta non residenziale} = \frac{\text{Superficie pavimento non residenziale}}{(\text{Superficie pavimento residenziale} + \text{Superficie pavimento non residenziale})} * 100 [\%]$ e In base alla formula: $\text{Condivisione superficie pavimento residenziale} = \frac{\text{Superficie pavimento residenziale}}{(\text{Superficie pavimento residenziale} + \text{Superficie pavimento non residenziale})} * 100 [\%]$, [30]. Una notevole quantità del terziario è costituita dalle strutture adibite alla vendita della merce (sia al dettaglio che all'ingrosso), a seguire, gli uffici pubblici e privati, le scuole, i ristoranti e infine la sanità (figura 5). Gli standard spaziali (espressi attraverso la superficie pro-capite) sono più alti nei paesi del Nord e dell'Ovest, mentre i paesi dell'Europa centrale e orientale riportano il maggior numero di residenze plurifamiliari dimostrando un'inferiore requisito di superficie per persona (figura 6). La ricchezza economica, la cultura e la domanda di alloggi a occupazione singola sono solo alcuni dei fattori che influenzano la dimensione degli spazi in cui viviamo e lavoriamo. La tendenza generale, tuttavia, è quella di cercare nel tempo spazi sempre più ampi quando le condizioni sociali ed economiche dell'utente lo permettono. Questo, insieme alle crescenti proiezioni della popolazione, riporta chiare implicazioni sui futuri bisogni

energetici, sottolineando la conseguente urgenza di migliorare le prestazioni energetiche dei nostri edifici.

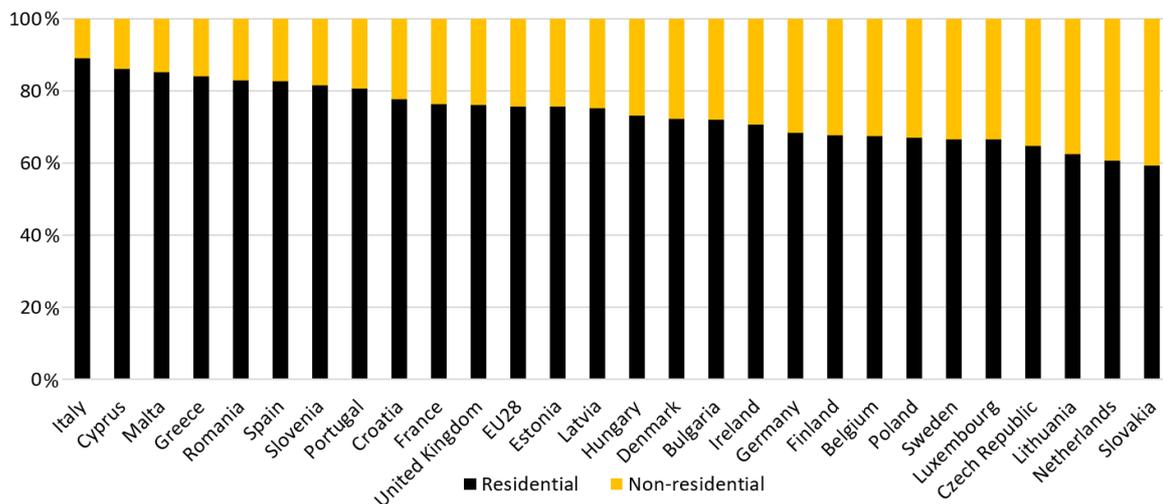


Figura 4: Ripartizione dell'area del pavimento dell'edificio – [30]

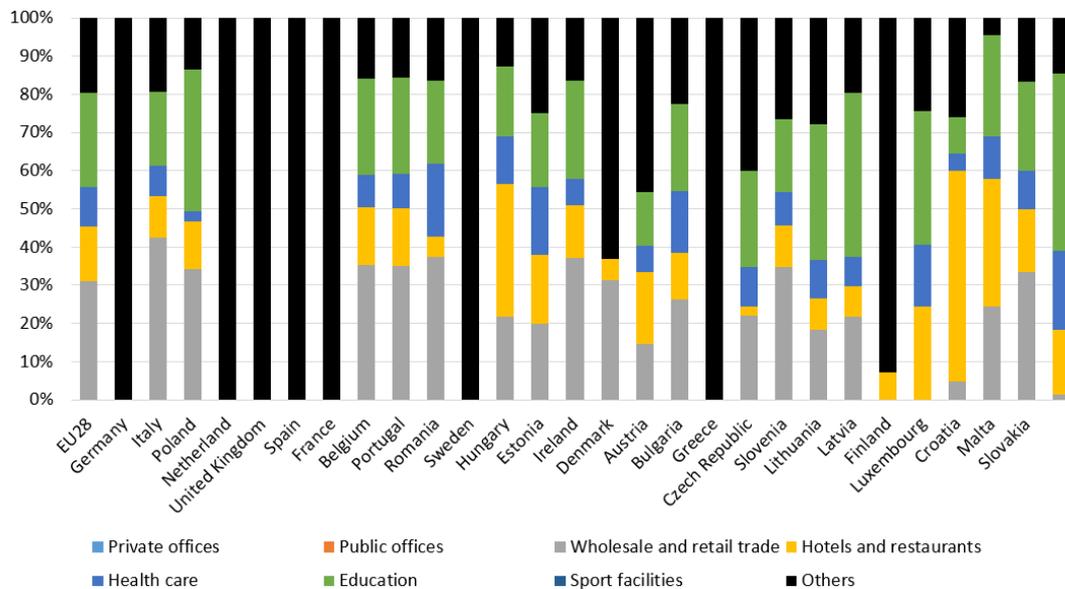


Figura 5: Ripartizione della superficie per sottosettore non residenziale - [30]

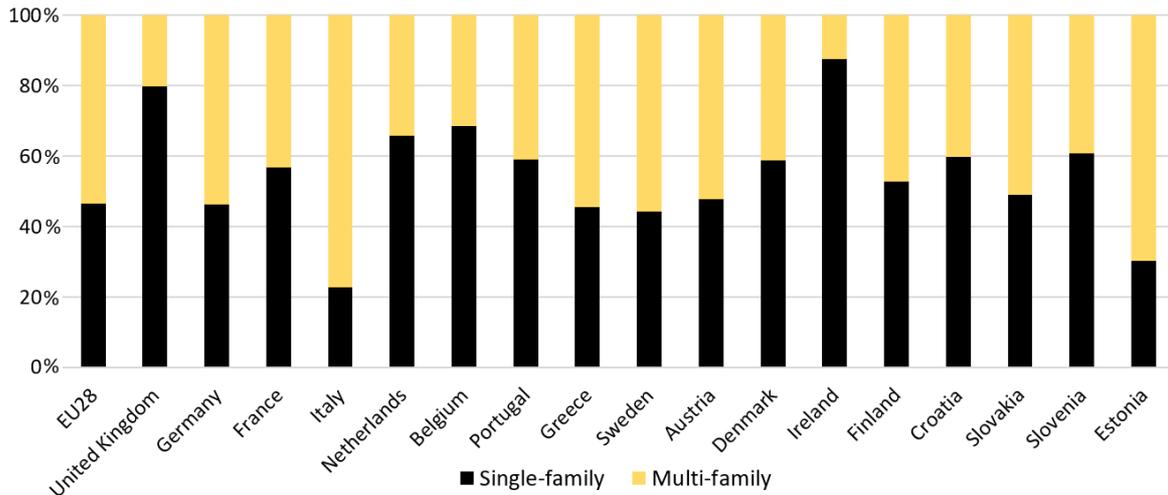


Figura 6: Suddivisione di edifici residenziali per tipologia: plurifamiliare e unifamiliare – 2015 [30]

Una quota sostanziale dello stock in Europa ha più di 50 anni, considerando l'Italia, oltre il 40% degli edifici residenziali è stato costruito prima degli anni '60, quando le normative sull'edilizia energetica erano molto limitate. A seguito dell'introduzione delle norme di prestazione energetica nei codici nazionali, gli edifici oggi consumano solo la metà degli edifici tipici degli anni '80. [5]. Le prestazioni energetiche dipendono da una serie di fattori quali l'efficienza del sistema di riscaldamento installato e dell'involucro dell'edificio, le condizioni climatiche della località, le caratteristiche di comportamento dell'utenza e le sue condizioni sociali. I dati sui livelli tipici di consumo di riscaldamento dello stock esistente confermano che il maggiore potenziale di risparmio energetico è associato alle strutture edilizie esistenti. Il gas è il carburante più utilizzato negli edifici dell'Europa centrale, mentre il consumo di petrolio è più elevato nell'Europa settentrionale e occidentale. Una progettazione e un funzionamento efficienti dei sistemi tecnici svolgono un ruolo importante nel consumo finale di energia di un edificio. La pompa di calore elettrica sembra essere la tecnologia più adatta, a causa del previsto aumento della quota di energia rinnovabile nel mix elettrico nazionale e della produzione rinnovabile in loco. Oltre alle pompe di calore, anche i micro-CHP a biomassa e i sistemi di teleriscaldamento (con una quota di energia rinnovabile almeno del 50%) saranno importanti per il futuro sviluppo del mercato nZEB. La figura 7 riassunta da Paoletti et al. [33] mostra la quota dei sistemi di riscaldamento più utilizzati, in base alla zona climatica in clima freddo è stato raccolto un campione di 234 edifici, in clima mite 160 e in clima caldo 17. Nei climi freddi, il boiler e il teleriscaldamento occupano le prime due posizioni delle più comuni tecnologie di riscaldamento, anche se la pompa di calore ha un utilizzo inferiore rispetto ai climi miti. La "pompa di calore" è la tecnologia più utilizzata, con una minore penetrazione in una zona climatica fredda (31%). Questa tecnologia è largamente adottata nei climi caldo-miti (42%) in quanto consente di raggiungere livelli prestazionali elevati con temperatura esterna mite, ed è

comunemente utilizzata per soddisfare anche le esigenze di raffrescamento nei periodi estivi. Altri aspetti tecnologici il cui miglioramento è necessario per far avanzare il mercato di nZEB riguarda l'impiego di materiali innovativi, infissi altamente efficienti e tecnologie HVAC prestazionali. Tuttavia, un'analisi di BPIE (Buildings Performance Institute Europe) ha mostrato come i mercati reali relativi a queste tecnologie debbano crescere in modo coerente per coprire la domanda futura dovuta agli nZEB.

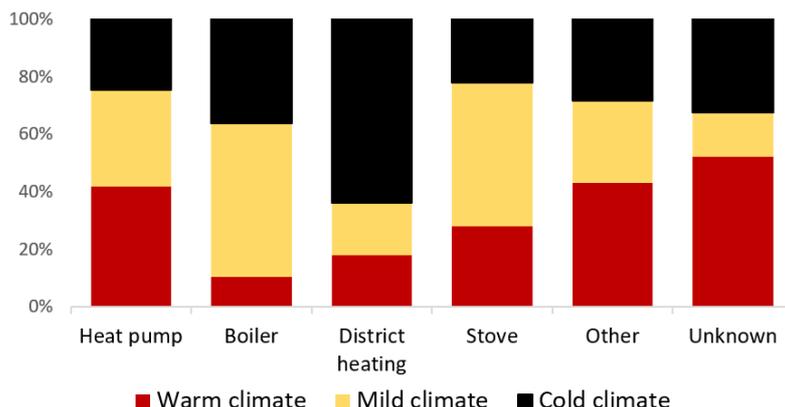


Figura 7: Percentuale di sistemi di riscaldamento in base alle zone climatiche

Le emissioni di CO₂ sono strettamente legate al particolare sistema energetico utilizzato negli edifici e differisce da paese a paese. Questo dipende dalla misura in cui l'energia rinnovabile viene impiegata negli edifici, l'uso del teleriscaldamento e della cogenerazione e le fonti di produzione di elettricità relative agli edifici. La ripartizione dei consumi energetici relativi all'anno 2017 è riportata nella figura 8.

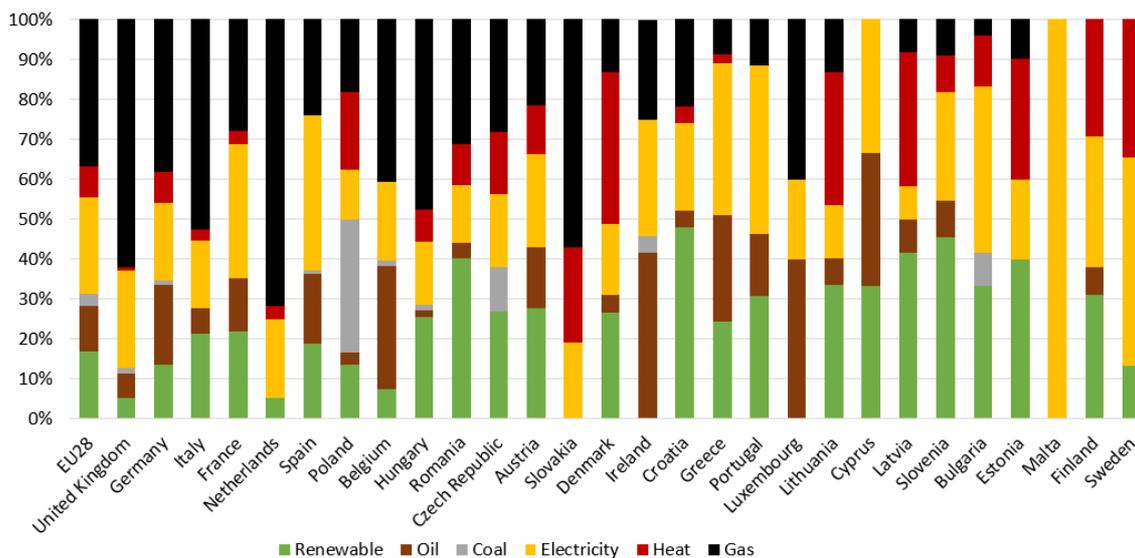


Figura 8: Ripartizione dei consumi energetici negli edifici residenziali 2017 - [30]

2.4-Ripartizione del patrimonio costruito Italiano

In Italia sono presenti circa 60.4 milioni di persone ripartiti in circa 14.5 milioni di edifici e oltre 31 milioni di abitazioni (ISTAT) [40]. Il 20% degli edifici è stato realizzato prima della Prima guerra mondiale e circa il 65% è stato costruito precedentemente al 1976, anno della prima legge per il risparmio energetico, figura 9 [42]

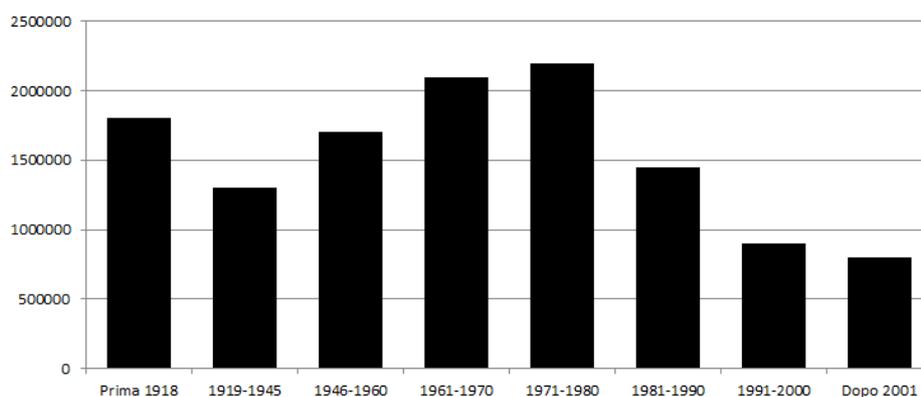


Figura 9: Numero edifici nel contesto italiano

2.4.1-Valutazione del parco immobiliare nazionale

La situazione dei fabbricati esistenti sul territorio nazionale è individuabile grazie ai censimenti dell'ISTAT e degli ultimi rilevamenti effettuati da ENEA, ANCE e CRESME. Sul territorio nazionale esistono circa 13,6 milioni di fabbricati di cui più del 87% sono destinati ad uso residenziale e il 13% ad uso terziario (figura 10). Circa 13 milioni di abitazioni su 31 milioni si concentrano nel territorio Siciliano, Lombardo, Veneto, Pugliese e Piemontese. Nel dettaglio, il 24,5% del totale delle abitazioni è imputabile alle sole due regioni di Sicilia e Lombardia. I fabbricati destinati all'uso abitativo sono circa 11 milioni e la rimanente parte è impiegata nel settore non residenziale. Per quanto riguarda le destinazioni non residenziali, quali alberghi, ristoranti e commercio, occupano la fetta più grande, mentre più di 400.000 fabbricati ospitano attività ricreative e sportive, scuole, ospedali e chiese. Infine, sul territorio nazionale, viene considerata anche una notevole fetta di circa 700.000 fabbricati non utilizzati, poiché considerati in condizioni precarie e destinati al recupero edilizio. [29]

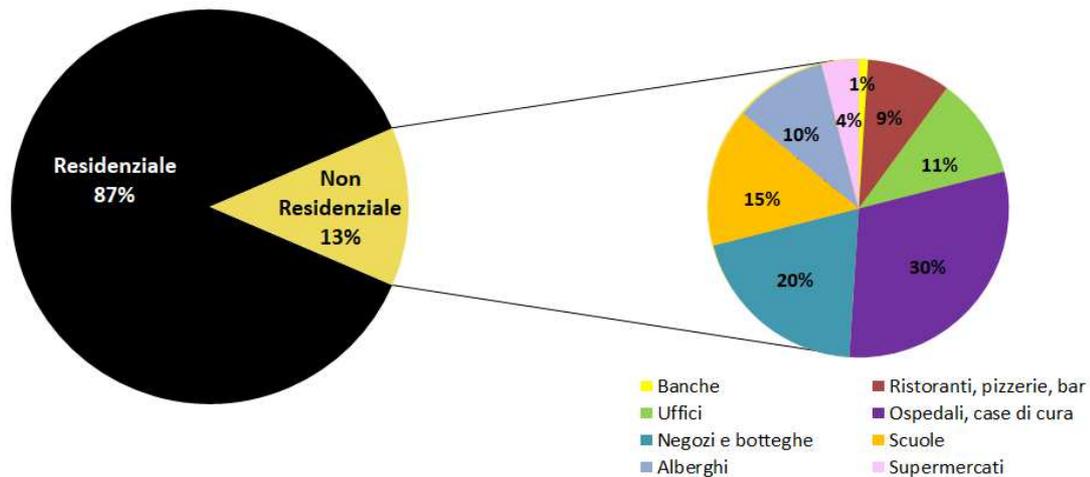


Figura 10: Suddivisione edifici Residenziali – Non residenziali

2.4.2-Edifici ad uso residenziale

A partire dagli anni 80, successivamente alle prime direttive energetiche, viene posta maggiore attenzione al settore edilizio, alle soluzioni tecnico economiche ed energetiche.

Da recenti studi condotti da ENEA sul patrimonio edilizio esistente italiano emerge che:

- Il 61,5% degli edifici a uso residenziale è costruito in muratura portante,
- il 24,7% dei fabbricati residenziali è in calcestruzzo armato
- 13,8% è costruito in materiali di altro tipo, quali legno, acciaio o strutture miste.
- Più del 50% è costituito da una struttura isolata rispetto agli altri edifici, mentre la restante percentuale è contigua ad altre strutture su uno o più lati.

Nel presente paragrafo è riportata una tabella prodotta da ENEA sull'osservatorio edilizio nazionale suddiviso per epoca di costruzione (Tabella 1). [41]

Tabella 1 – Edifici nel 2011 per epoca di costruzione e struttura portante

	Prima 1919	1915-1945	1946-1961	1962-1971	1972- 1981	1982- 1991	1992- 2001	Dopo il 2001	Totale edifici
Muratura portante	2.026.538	1.183.869	1.166.107	1.056.383	823.523	418.914	228.648	106.812	7.010.794
Calcestruzzo armato	0	83.413	288.784	591.702	789.163	620.698	394.445	389.059	3.157.264
Altro	123.721	116.533	204.938	319.872	370.520	250.890	167.934	40.282	1.594.690
Totale edifici	2.150.259	1.383.815	1.659.829	1.967.957	1.983.206	1.290.502	791.027	536.153	11.762.748

Negli anni antecedenti il 1919 sono stati costruiti circa 2 milioni di fabbricati che equivale più o meno al 20% del patrimonio edilizio odierno. Mentre il periodo compreso tra le due guerre mondiali è considerato un momento di stallo per l'attività costruttiva, comportando la realizzazione di solo il 12% dei fabbricati, il secondo dopoguerra ha segnato un incremento di circa il 50% del parco nazionale odierno. Questa esplosione costruttiva che ha visto impegnati gli anni 60 e 70 fino ai primi degli anni 80, ha comportato una crescente saturazione del campo edilizio causando un nuovo stallo nel settore immobiliare [42]. Le stime dimostrano che:

- il 15% della popolazione italiana abita in fabbricati costruiti tra il '46 e il '61,
- il 21% abita in fabbricati realizzati tra il '62 e il '71,
- il 20% abita in edifici realizzati dal '72 in poi.
- poco più del 10% degli edifici è stato costruito successivamente al 2001.

Le tipologie edilizie si distinguono in isolate e condominiali, diversificandosi tra:

- 26 % ville, case indipendenti
- 21 % case a schiera, piccole palazzine condominiali
- 18% edifici plurifamiliari a torre
- 15% edifici plurifamiliari in linea

Tra questi una buona parte degli edifici ha il pian terreno chiuso da pareti vetrate, negozi o ha un piano pilotis per il ricovero autoveicoli.

2.4.3-Verso l'adozione degli nZEB

L'Italia definisce un NZEB come un edificio ad altissima prestazione energetica in cui il fabbisogno energetico (molto basso o quasi nullo) è coperto in misura significativa da energia da fonti rinnovabili, prodotta in loco. Un edificio a energia quasi zero (NZEB), sia di nuova costruzione che esistente, deve rispondere ai seguenti requisiti tecnici:

- stabiliti dal DM 26 giugno 2015 "Requisiti minimi degli edifici" sono rispettati gli **obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili** nel rispetto dei principi minimi di cui all'Allegato 3, paragrafo 1, lettera c), del D.Lgs 3 marzo 2011, n. 28.
- decreto-legge n. 63 del 2013 convertito nella legge n. 90 del 2013, per recepire le novità introdotte con la direttiva 2010/31/UE e che modificano le disposizioni del n. 192, di attuazione della direttiva 2002/91/CE. Il decreto-legge fissa i nuovi criteri per l'aggiornamento e la programmazione di standard prestazionali degli edifici (involucro, impianti e fonti rinnovabili) al fine di raggiungere gli obiettivi fissati a livello europeo in materia di edifici a energia quasi zero. La Legge di Bilancio 2018 ha recentemente apportato importanti modifiche al decreto, sul tema delle detrazioni fiscali per interventi di efficienza energetica.

È considerato “edificio a energia quasi zero” ogni edificio che risponderà a precisi requisiti tecnici (Tabella 2). In particolare, l'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale e quella estiva, l'indice di prestazione energetica globale espresso in energia primaria non rinnovabile o totale, dovranno risultare inferiori ai valori dei corrispondenti indici calcolati per l'edificio di riferimento. L'edificio di riferimento è un edificio virtuale geometricamente equivalente a quello di progetto ma dotato dei parametri energetici e delle caratteristiche termiche minime. In base a tale criterio di confronto in funzione ai risultati del cost-optimal, è anche possibile definire un range per il consumo di energia primaria espresso in kWh/m² anno, differenziato per tipologia, localizzazione ed uso dell'edificio. L'analisi tiene conto dei benefici e dei costi dovuti all'adozione di misure di efficienza energetica lungo il ciclo di vita atteso di un edificio (assunto pari a 30 anni per i residenziali e 20 anni per le altre categorie). Le regole con cui effettuare tale analisi sono state definite dalla Commissione attraverso la cosiddetta "cost-optimal methodology" che deve essere applicata da ogni Stato Membro.

Tabella 2 – Requisiti degli nZEB italiani

Requisiti da rispettare nella progettazione nZEB – Decreto Ministeriale 26.06.2015		
H'T [W/ m² K]	Coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente	$H'T < H'T_{limite}$; Tabulato e variabile con S/V e zona climatica
A sol,est / Asup utile	Area solare equivalente estiva per unità di superficie utile;	$A_{sol,est} / A_{sup\ utile} \leq A_{sol,est} / A_{sup\ utile\ limite}$; il valore è tabulato e varia con la categoria dell'edificio.
EP_{H,nd} [kWh/m²]	Indice di prestazione termica utile per riscaldamento;	$EP_{H,nd} < EP_{H,nd\ limite}$; Limite relativo all'edificio di riferimento
η_H, η_C, η_w	Efficienza media stagionale dell'impianto di climatizzazione invernale (H); estiva ed eventuale controllo umidità (C); acs (W)	$\eta_H > \eta_{Hlimite}$; $\eta_H > \eta_{Hlimite}$; $\eta_H > \eta_{Hlimite}$; Valori, in forma tabellare delle efficienze medie dei sottosistemi di utilizzazione e generazione riferiti all'edificio di riferimento.
EP_{C,nd} [kWh/m²]	Indice di prestazione termica utile per raffrescamento;	$EP_{C,nd} < EP_{C,nd\ limite}$; Limite relativo all'edificio di riferimento
EP_{gl,tot} [kWh/m²]	Indice di prestazione globale dell'edificio	$EP_{gl,tot} < EP_{gl,tot\ limite}$; Limite relativo all'edificio di riferimento
U trasmittanze [W/m²K]	Trasmittanze pareti, copertura, pavimento, chiusure trasparenti e opache.	U < Valori tabellati delle trasmittanze termiche dell'involucro dell'edificio di riferimento

Integrazione delle fonti di energia rinnovabile (FER) _ Decreto legislativo 28/2011

50 % minimo di copertura del consumo energetico complessivo (acs, riscaldamento e raffrescamento). Nessun obbligo se l'edificio è allacciato ad una rete di teleriscaldamento che ne copre l'intero fabbisogno.	Potenza elettrica degli impianti alimentati da fonti rinnovabili da installare sopra, all'interno o nella relativa pertinenza 1/50 dell'impronta dell'edificio
---	--

Per gli edifici pubblici, tali obblighi sono incrementati del 10%

Con la Bozza non ancora in vigore 31/01/2020 decreto legislativo recante attuazione della direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo e del Consiglio che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, cambiano i requisiti cui attenersi nella valutazione della prestazione energetica degli edifici. Infatti, Secondo il decreto, i requisiti degli edifici nuovi o ristrutturati devono rispettare i parametri del benessere termo-igrometrico degli ambienti interni, della sicurezza in caso di incendi e dei rischi connessi all'attività sismica. Saranno aggiornati la metodologia di calcolo e i requisiti della prestazione energetica degli edifici, le indicazioni sugli impianti tecnici sui punti di ricarica per le auto elettriche. Saranno aggiornati anche i requisiti professionali per l'attestazione della prestazione energetica degli edifici. Inoltre, il Ministero dello Sviluppo Economico ha pubblicato il testo Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima, in cui sono stabiliti gli obiettivi nazionali al 2030 sull'efficienza energetica, sulle fonti rinnovabili e sulla riduzione delle emissioni di CO2. Il seguente piano contiene anche gli obiettivi per la sicurezza energetica, lo sviluppo e mobilità sostenibile e il mercato dell'energia, delineando le misure il raggiungimento degli obiettivi. Nel dettaglio, i principali obiettivi per l'UE e in particolare per l'Italia, sono delineati nella Tabella 3 sottostante, mentre nella figura 11 è riportato un quadro di sintesi sui risparmi di Mtep attesi per l'anno 2030.

Tabella 3 – Principali obiettivi su energia e clima dell'UE e dell'Italia al 2020 e al 2030

Energie rinnovabili (FER)	Obiettivi 2020 UE ITALIA		Obiettivi 2030 UE ITALIA (PNIEC)	
Quota FER nei consumi Finali Lordi	20%	17%	32%	30%
Quota FER nei consumi Finali Lordi nei trasporti	10%	10%	14%	22%
Quota FER nei consumi Finali Lordi per riscaldamento e raffrescamento			+1.3% annuo (indicativo)	+1.3% annuo (indicativo)

Efficienza energetica				
Riduzione dei consumi di energia rispetto allo scenario PRIMES 2007	-20%	-24%	-32.5% (indicativo)	-43% (indicativo)
Risparmi consumi finali tramite regimi obbligatori efficienza energetica	-1.5 % annuo (senza trasp.)	-1.5 % annuo (senza trasp.)	-0.8 % annuo (con trasp.)	-0.8 % annuo (con trasp.)
Emissioni gas serra				
Riduzione dei GHG vs 2005 per tutti gli impianti vincolati dalla normativa ETS	-21%		-43%	
Riduzione dei GHG vs 2005 per tutti i settori non ETS	-10%	-13%	-30%	-33%
Riduzione complessiva dei gas a effetto serra rispetto ai livelli del 1990	-20%		-40%	
Interconnettività elettrica				
Livello di interconnettività elettrica	10%	8%	15%	10%
Capacità di interconnessione elettrica (MW)		9.285		14.375

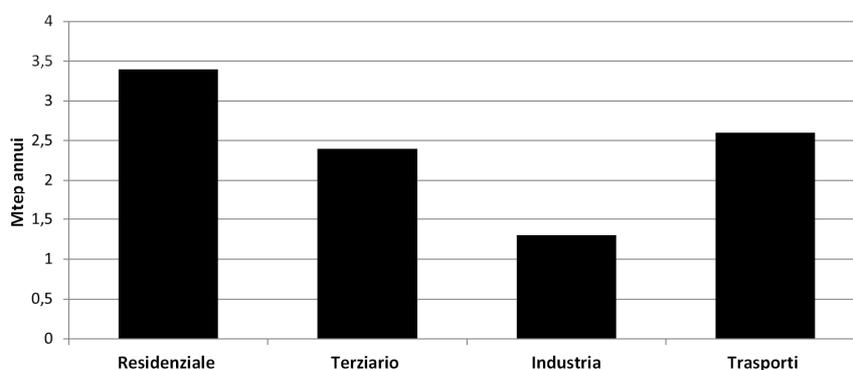


Figura 11: Quadro di sintesi dei risparmi attesi nell'anno 2030, per settore (Mtep di energia finale)

Il rapporto ENEA 2019, "Osservatorio degli edifici a energia quasi zero in Italia" riporta una stima percentuale di nZEB in Italia dello 0,003%, per un **totale di circa 1400 edifici nZEB in Italia al 30 giugno 2018**. Per cui, su base regionale, la percentuale di nZEB rispetto al parco di edifici esistenti non eccede quindi lo 0,03% (figura 12).

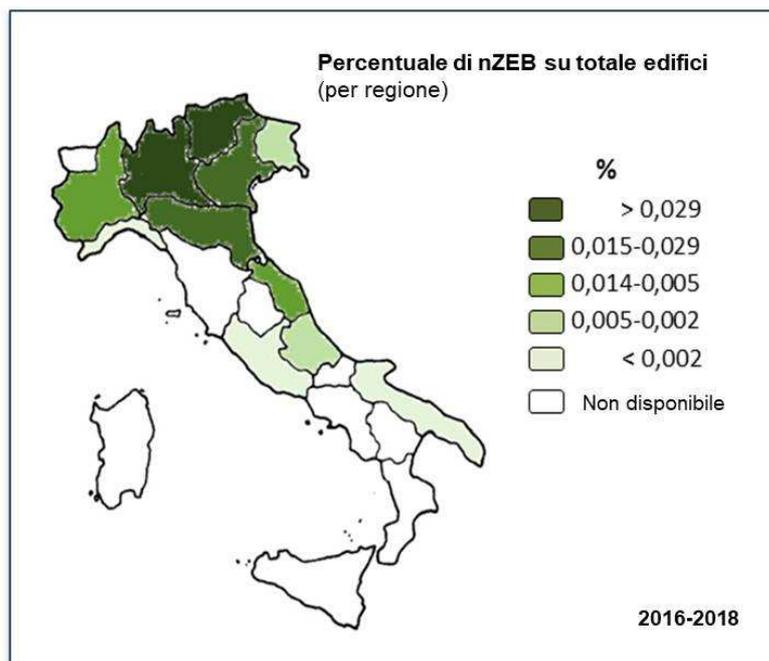


Figura 12: Osservatorio degli edifici a energia quasi zero in Italia

2.5-Stato dell'arte delle tecnologie nZEB

L'impiego delle nuove tecnologie nell'edilizia è facilmente implementabile nelle nuove costruzioni, ad esempio attraverso l'utilizzo di materiali altamente performanti. Un isolamento termico adeguato all'involucro dell'edificio è essenziale per proteggere le dispersioni tra ambiente interno ed esterno, minimizzando il trasferimento termico durante i periodi invernali ed estivi. La mancanza di un idoneo strato isolante nelle stratigrafie degli edifici più vecchi è un dato che emerge in tutti i paesi europei, a causa della mancanza di standard di isolamento propria di quegli anni. Stabilire il livello adeguato di ermeticità negli edifici è, quindi, un aspetto chiave dal punto di vista del consumo di energia e delle condizioni di comfort degli occupanti. Molte tecnologie necessarie per il raggiungimento dei requisiti nZEB sono già disponibili, tuttavia il mercato è tutt'ora aperto al miglioramento tecnologico, nonché alla potenziale riduzione dei costi. Al fine di realizzare un nZEB, è essenziale ridurre al minimo la domanda di energia per le operazioni di costruzione e fornire la gran parte di domanda di energia rimanente con energie rinnovabili in loco. Per quest'ultima, sono considerate particolarmente adatte le soluzioni fotovoltaiche e solari termiche all'avanguardia. Nel progetto ZEBRA2020 vengono analizzati più di 400 edifici nZEB (nuovi e rinnovati) valutando i rispettivi set di soluzioni. Sono stati distinti edifici di nuova costruzione ed edifici rinnovati, edifici residenziali e non residenziali e tre diverse zone climatiche. I risultati sono riassunti nella Tabella 4 [28].

Tabella 4 – Edifici e tecnologie analizzate nel progetto ZEBRA 2020

	NUOVE COSTRUZIONI NZEBS	RISTRUTTURAZIONI NZEBS
Energia passiva	Isolamento termico; U-valori: Parete: 0,15 - 0,20 W / (m ² K)	Isolamento termico; U-valori: Parete: 0,10 - 0,20 W / (m ² K)
Soluzioni di efficienza	Tetto: 0,10 - 0,25 W / (m ² K) Windows: triplo vetro; circa. 0.85 - 1,0 W / (m ² K) Soluzioni di raffreddamento passivo: schermature, ventilazione naturale, massa termica, notte raffreddamento	Tetto: 0,10 - 0,20 W / (m ² K) Windows: triplo vetro; circa. 0.9 - 1,15 W / (m ² K) Soluzioni di raffreddamento passivo: schermature, ventilazione naturale, massa termica, notte raffreddamento
Soluzioni di efficienza energetica attiva	Ventilazione meccanica con recupero di calore Riscaldamento: pompe di calore o teleriscaldamento Acqua calda: stesso sistema per riscaldamento e acqua calda in climi freddi, altrimenti generazione di acqua calda dedicata, che è anche parzialmente dipendente dal solare termico. In caso di riscaldamento, viene utilizzata la pompa di calore	Ventilazione meccanica con recupero di calore Riscaldamento: caldaia a condensazione (spesso a gas) o teleriscaldamento; le pompe di calore svolgono solo un ruolo minore rispetto ai nuovi edifici Acqua calda: stesso sistema di riscaldamento e acqua calda in climi freddi, generazione di acqua calda dedicata non diffusa come nei nuovi nZEB; parzialmente dipendente dal solare termico. In caso di raffrescamento, viene utilizzata la pompa di calore
Energia rinnovabile	PV, solare termico	PV, solare termico

Secondo Paoletti e Pascual [33] del progetto ZEBRA, è essenziale per il raggiungimento dei requisiti nZEB un isolamento termico adeguato per ridurre il fabbisogno energetico di riscaldamento e raffreddamento. Per quanto riguarda i valori U delle pareti esterne, non vi è alcuna differenza significativa tra nZEB di nuova costruzione e rinnovati; i valori U sono compresi tra 0,1 e 0,2 W / (m²K). Il valore U dei tetti è in un intervallo simile da 0,1 a 0,25 W / (m²K) e in entrambi i casi vengono considerate unicamente le finestre a triplo vetro. Inoltre, vengono applicate soluzioni passive per ridurre al minimo la domanda di energia di raffrescamento, come ad esempio le schermature, la ventilazione e il raffrescamento notturni in combinazione con l'attivazione della massa termica dell'edificio. Nel sistema attivo, per ridurre le perdite di calore e quindi il fabbisogno energetico, viene utilizzata in quasi tutti gli nZEB la ventilazione meccanica con recupero di calore. Poiché i sistemi di teleriscaldamento hanno spesso energia primaria e fattori di emissione relativamente buoni e le pompe di calore forniscono calore ad alta efficienza, queste tecnologie di riscaldamento sono le più diffuse negli attuali nZEB. Tuttavia, le caldaie a condensazione rinnovate (a gas) svolgono ancora un ruolo importante, ma sono sempre combinate con i collettori solari termici, che vengono utilizzati almeno per fornire acqua calda sanitaria. L'acqua calda è (specialmente negli edifici residenziali) generalmente fornita dallo stesso sistema del calore per il riscaldamento degli ambienti e spesso esiste un sistema solare termico per fornire

almeno una parte dell'acqua calda sanitaria da fonti rinnovabili. Le soluzioni di raffreddamento attivo sono installate in nZEB esclusivamente in climi estivi caldi e l'unica tecnologia segnalata nella ricerca [33] è la pompa di calore (caldo-freddo). Sul Data-mapper [30] del sito della commissione europea è stato possibile ricavare la quota di nZEB per gli edifici di nuova costruzione a uso residenziale aggiornata al 2015. Il grafico in figura 13 evidenzia come la quota nZEB in tutta Europa sia ancora molto bassa.

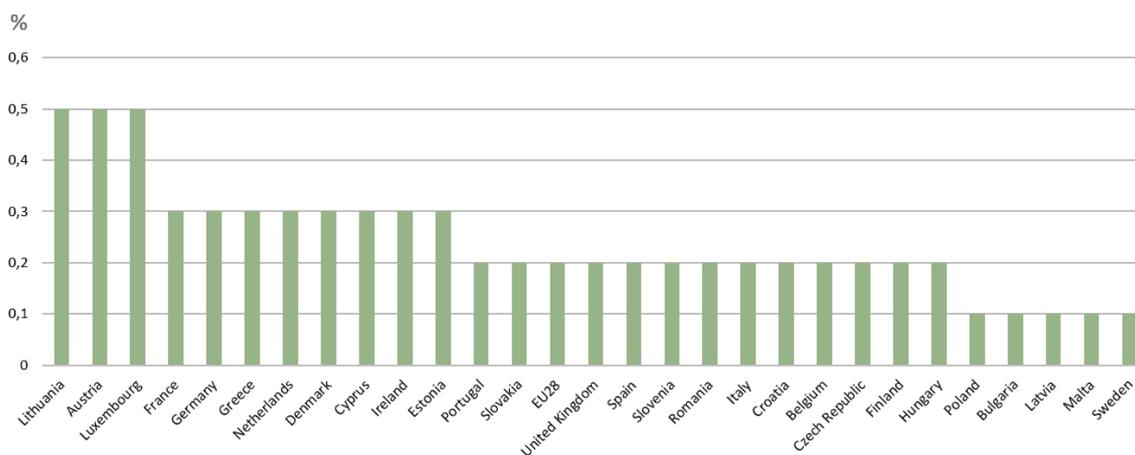


Figura 13: Quota di edifici a energia quasi zero (nZEB) nelle nuove costruzioni per uso residenziale - 2015

2.6-I costi per le costruzioni nZEB

Il raggiungimento delle alte prestazioni degli edifici nZEB deve andare di pari passo con la valutazione dell'ottimizzazione dei costi. Il costo di un edificio ad alta efficienza energetica è generalmente più elevato a causa dei costi aggiuntivi associati a una migliore qualità delle tecnologie e dei materiali utilizzati. La direttiva EPBD ha dichiarato che gli Stati membri devono "adottare le misure necessarie per garantire che siano stabiliti i requisiti minimi di prestazione energetica per gli elementi di costruzione dell'involucro dell'edificio quando vengono costruiti o sostituiti, al fine di raggiungere livelli ottimali in termini di costi". Inoltre, le linee guida del Regolamento delegato (UE) 244/2012 della Commissione che accompagna l'integrazione dell'EPBD ha stabilito "un quadro metodologico comparativo per il calcolo dei livelli ottimali in termini di costi dei requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici" [34]. Ottimizzazione dei costi significa che la progettazione dell'edificio, dall'involucro ai sistemi tecnici, deve tenere conto delle soluzioni a risparmio energetico con costi minimi del ciclo di vita. Nell'UE28, gli attuali investimenti del settore residenziale in ristrutturazioni energetiche sono circa 200 miliardi di euro all'anno e altri 300 miliardi di euro per ristrutturazioni non-energetiche nel settore residenziale. Ulteriori 200 miliardi vengono investiti in edifici non-residenziali. Pascual et al. 2016 [29] mostra in un grafico (figura 14) i costi per la costruzione di edifici nZEB.

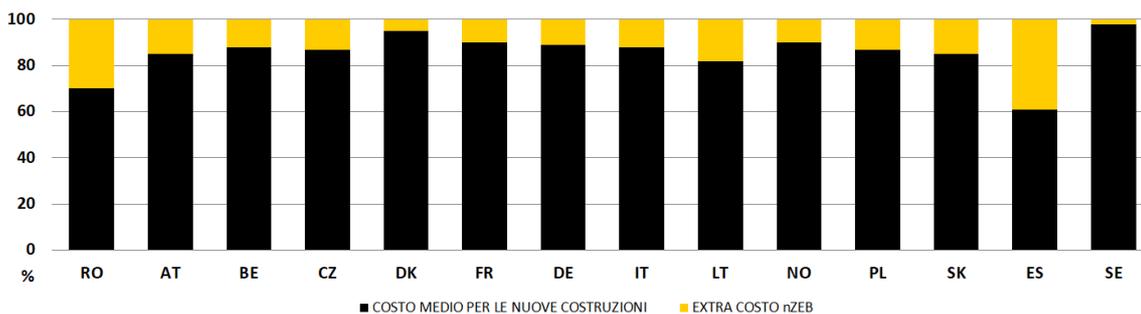


Figura 14: Costo extra per le costruzioni di nZEB rispetto al costo medio di nuove costruzioni [33]

Attraverso soluzioni di progettazione integrata è possibile risparmiare fino all'80% dei costi operativi; tuttavia, vi è ancora una presa di mercato limitata. Il progetto CRAVEzero [28] ha pubblicato un report sulla riduzione e sul mercato dei costi per edifici nZEB. Il recente progetto europeo ha individuato le aree di riduzione dei costi e miglioramento delle prestazioni nella realizzazione di edifici ad elevata efficienza energetica. Sulla base degli attuali livelli di mercato sono state analizzate varie tecnologie dal diverso potenziale di riduzione dei costi, nonché sono state prodotte delle previsioni per ciascuna tecnologia. I potenziali di riduzione dei costi dal 2016 al 2050 sono riassunti nella figura 15.

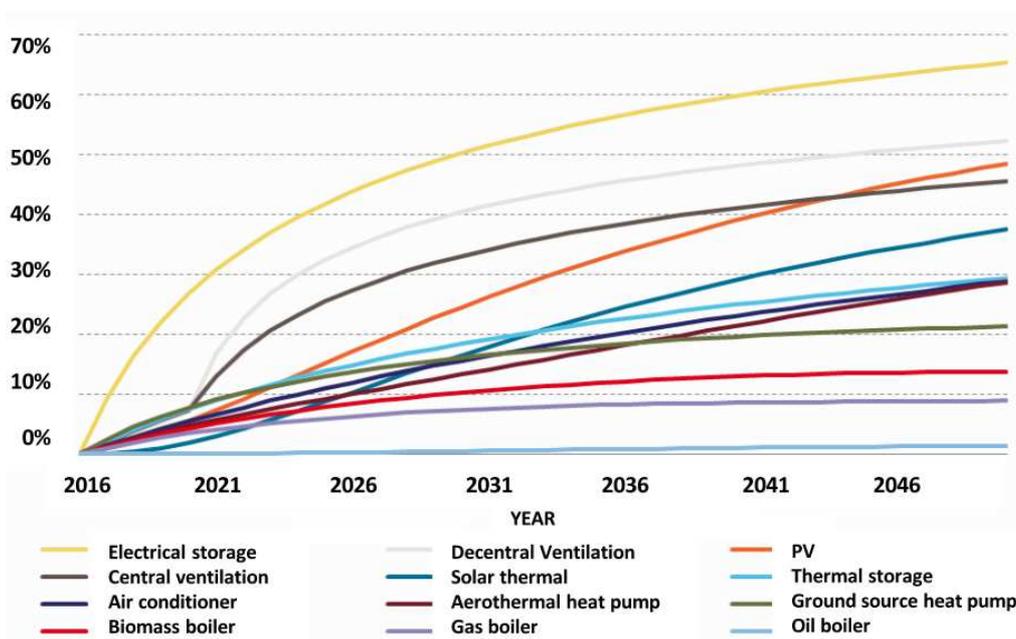


Figura 15: Potenziale di riduzione fino al 2050 dei costi delle principali tecnologie Nzeb: Fonte CRAVEzero [28]

Nel dettaglio, le tecnologie consolidate a base di combustibili fossili (*caldaie* a petrolio e gas) hanno il potenziale di riduzione dei costi più basso fino al 2050 (rispettivamente solo circa l'1% e il 9%). Uno dei motivi principali, sono le elevate emissioni di CO₂ che producono, che contraddicono gli obiettivi di protezione del clima dell'Unione europea. È prevista invece una quota di mercato leggermente superiore per le caldaie a biomassa

più rispettose dell'ambiente utilizzando un combustibile rinnovabile. Le caldaie a biomassa hanno un potenziale di riduzione dei costi di circa il 14% fino al 2050. Le **pompe di calore** sono viste come una tecnologia di riscaldamento e raffrescamento centralizzato in un sistema energetico basato su energie rinnovabili in quanto sono una tecnologia importante per l'accoppiamento del settore elettrico e del riscaldamento. Pertanto, si prevede che un forte aumento del mercato comporterà una riduzione dei costi di oltre il 20% entro il 2050. I **sistemi di ventilazione** rivestono un'importanza fondamentale per gli edifici ad alta efficienza energetica. Forniscono aria fresca, riducono le perdite di calore di ventilazione se dotati di sistemi di recupero del calore e assicurano una buona qualità dell'aria rimuovendo umidità, muffe, inquinanti e vapori. Soprattutto negli edifici ermetici la ventilazione meccanica è necessaria per assicurare una buona qualità dell'aria. Il mercato dei sistemi di ventilazione probabilmente crescerà nei prossimi decenni, portando a una riduzione dei costi di circa il 46% - 52% entro il 2050. Gli **accumuli termici ed elettrici** diventano più importanti in un sistema energetico basato su energie rinnovabili. Entrambi i tipi di stoccaggio hanno notevoli possibilità di riduzione dei costi di circa il 29% (termico) e il 65% (elettrico) entro il 2050. Con l'aumento dei requisiti di comfort interno e un ulteriore riscaldamento globale, la necessità di **condizionamento / raffrescamento** sta aumentando, portando a un forte aumento del mercato e con potenziali di riduzione dei costi associati di circa il 29% entro il 2050. Il **fotovoltaico** è una fonte di energia rinnovabile consolidata con un mercato globale, ma presenta ancora un potenziale di ottimizzazione. In tutti gli scenari futuri con basse emissioni di gas serra, il fotovoltaico svolge un ruolo chiave nel raggiungimento degli obiettivi di emissione e nella generazione della quantità richiesta di elettricità rinnovabile. Potenziali di riduzione dei costi elevati sono previsti in quanto è indispensabile un rapido sviluppo del mercato fino al 2050 per poter raggiungere gli obiettivi climatici e di emissione dell'accordo di Parigi [32]. Il potenziale di riduzione dei costi stimato è di circa il 49% entro il 2050. Oltre all'uso stabilito sul tetto, il **fotovoltaico integrato nell'edificio (BiPV)** è un nuovo campo promettente e in crescita. I **sistemi solari termici** - anche se già molto diffusi - hanno ancora un potenziale di riduzione dei costi del 38% entro il 2050. Come per i sistemi fotovoltaici, esiste la possibilità di integrare i sistemi solari termici nell'involucro dell'edificio (ad esempio la facciata) e sostituire alcuni elementi costruttivi, contribuendo alla riduzione complessiva dei costi di costruzione. Infine, **l'isolamento** svolge un ruolo importante nel ridurre la domanda complessiva di energia, in particolare per quanto riguarda il fabbisogno di riscaldamento nelle regioni a clima moderato e freddo. Tuttavia, per i materiali isolanti consolidati e diffusi non è prevista alcuna ulteriore riduzione dei costi; le riduzioni dei costi sono previste solo per materiali nuovi / innovativi e mediante migliori processi di montaggio. Ci sono poi le **strategie passive** come il **raffrescamento notturno o la ventilazione naturale**, che riducono il fabbisogno energetico finale di un edificio e diventano sempre più importanti per la realizzazione di nZEB. Per il patrimonio esistente, il progetto

ZEBRA2020 analizza quattro scenari derivati dalla combinazione specifica di tassi di rinnovo e percorsi di rinnovo (Tabella 5). Gli scenari sono strutturati su quattro livelli di rinnovo in base a come viene stimolato il mercato delle ristrutturazioni e qual è l'ambizione del risparmio energetico [33].

Tabella 5 – Scenari analizzati nel progetto ZEBRA 2020

Linea di base	Modesta	Intermedia	Ambiziosa
Tasso di rinnovo base e percorso di rinnovo della linea di base	Tasso di rinnovo lento e percorso di rinnovamento poco profondo	Tasso di rinnovo medio e percorso di rinnovo intermedio	Tasso di rinnovo rapido e percorso di rinnovamento profondo

In base a ciascuno scenario viene valutato:

- Costi di investimento e risparmi sui costi energetici in milioni di € entro il 2050.
- Risparmio energetico annuo cumulativo nel 2050.
- Tasso di rendimento interno.
- Generazione media annua di posti di lavoro generati.

I risultati sono suddivisi in uso residenziale (casa unifamiliare e casa plurifamiliare) e uso non residenziale (pubblico e non pubblico). I maggiori risparmi energetici in tutti i paesi si ottengono nello scenario "ambizioso", seguito dallo scenario "intermedio". I maggiori risparmi energetici derivano da investimenti in ristrutturazioni più profonde, con una percentuale maggiore di ristrutturazione quindi di livello nZEB raggiunto. Inevitabilmente, è richiesto un maggior investimento che consegue un risparmio sui costi della vita. Il lavoro stima che tutti gli investimenti per le ristrutturazioni energetiche offrono un tempo di ritorno degli investimenti in media dal 10% al 20%. In base al tipo di edificio, gli interventi nelle case unifamiliari sono i più convenienti in 11 dei 14 paesi analizzati, ad eccezione di Italia, Spagna e Slovacchia, dove i lavori di ristrutturazione di edifici non residenziali sembrano invece essere gli interventi più redditizi. Gli scenari ambiziosi hanno i valori più alti di risparmio energetico cumulativo entro il 2050. In Italia, Romania, Polonia, Lituania, Germania, Norvegia, Repubblica Ceca e Slovacchia i risparmi energetici cumulativi superano il 60%, mentre in Belgio, Francia e Danimarca sono tra il 40% e il 50% e Austria, Spagna e Svezia occupano posizioni intermedie con risparmi energetici cumulativi tra il 50% e il 60%. In aggiunta, esiste un forte legame tra gli investimenti nella ristrutturazione (energetica) e la forza lavoro attiva per l'esecuzione dei lavori. Il numero totale medio di dipendenti a tempo pieno nel settore delle costruzioni coinvolti nella ristrutturazione di edifici residenziali è stimato a circa 4,6 milioni all'anno per il periodo 2012-2016 e 1,9 milioni per la ristrutturazione di edifici non-residenziali. Ciò illustra la significativa forza lavoro aggiuntiva necessaria se

l'intensità dei rinnovamenti energetici aumentasse significativamente nei prossimi anni. Il nuovo quadro di politica energetica creato con il pacchetto "Energia pulita per tutti gli europei" nel 2016 [35] offre diverse opportunità. Gli strumenti come le ristrutturazioni a lungo termine o l'iniziativa Smart Finance for Smart Buildings offrono strategie per la trasformazione futura. Per quanto riguarda i posti di lavoro netti medi annui generati nello scenario ambizioso, l'impatto maggiore in relazione alla dimensione della popolazione è in Danimarca, Norvegia e Italia, mentre l'impatto sarebbe inferiore in Romania, Slovacchia e Polonia. Considerando che l'edilizia richiede principalmente posti di lavoro con scarse competenze, si prevede che vi sarà un effetto di sostituzione minore - probabilmente a causa degli investimenti complessivamente decrescenti nell'edilizia - ma le cifre relative alla generazione di posti di lavoro andranno a beneficio soprattutto della forza lavoro disoccupata poco qualificata. In ultima analisi, lo scenario ambizioso risulta quello più redditizio in termini di risparmio energetico e riduzione di CO₂, tuttavia, le decisioni di investimento devono essere prese da milioni di singoli proprietari di immobili, dai proprietari di case, dai fornitori di alloggi sociali e imprese, alle PMI e agli enti pubblici. Il valore più elevato del tasso di rendimento interno è superiore al 30% in Romania, Repubblica Ceca, Spagna e Slovacchia, ma inferiore al 20% in Italia e Francia, mentre la Danimarca registra rendimenti degli investimenti leggermente superiori al 5% a causa di maggiori costi di ristrutturazione. La prospettiva dell'investitore, pertanto, è realistica e sono necessarie ulteriori ricerche politiche che tengano conto degli elementi specifici che compaiono nella legislazione, nei sistemi di sostegno e negli incentivi di ciascun paese. Guardigli et al. [36] ha valutato la sostenibilità economica di varie alternative di progetto con valore attuale netto e costi globali, ma includendo anche aspetti sociali. Pertanto, il risparmio energetico e il compromesso economico sono ampiamente utilizzati in letteratura [37], soprattutto se il proprietario del patrimonio edilizio è una pubblica amministrazione [38] o una società di edilizia popolare [39]. L'attuale contesto politico non supporta il mercato delle ristrutturazioni e l'esempio dei costi energetici è significativo. Sovvenzioni non discriminatorie di vettori energetici per edifici (ad es. non correlato al reddito) porta a percezioni distorte e ai proprietari disincentivi a intraprendere lavori di ristrutturazione. Tuttavia, è chiaro che la maggior parte dei proprietari di immobili non intraprende un'analisi costi-benefici del ciclo di vita completo. Insieme alla mancanza di finanziamenti disponibili e al desiderio di rapidi rimborsi, molti investitori attualmente non optano per l'opzione economicamente più vantaggiosa nel tempo. Per questi motivi, è necessario un intervento politico al fine di aumentare la probabilità che i proprietari di immobili facciano la scelta giusta a lungo termine. È necessario basarsi sugli schemi di finanziamento esistenti e aiutare il mercato dei lavori di ristrutturazione dell'efficienza energetica a conseguire l'obiettivo altamente ambizioso di rinnovare il patrimonio edilizio a quasi zero livelli di energia entro la metà del secolo.

CAPITOLO 3: LO STATO DELL'ARTE DELLA MODELLAZIONE INFORMATIVA DEGLI EDIFICI

Attualmente, l'industria delle costruzioni nazionale si trova ad essere criticata per le sue scarse prestazioni e per i metodi di lavoro troppo tradizionali rispetto alle realtà estere, che comportano risultati poco produttivi, non collaborativi e inefficienti. Molti ricercatori hanno sottolineato che le procedure inefficaci nelle pratiche di costruzione sono dovute alla frammentazione del settore edile, alla mancanza di fiducia tra le parti, alle impostazioni contrattuali sfavorevoli e alla mancanza di attenzione da parte del cliente nel processo di produzione [43-45]. Ciò è determinato allo scarso coordinamento tra le pratiche multidisciplinari che gestiscono e scambiano informazioni tra i vari professionisti, in particolare nella fase di progettazione. Negli ultimi due decenni, gli attori del processo sono stati fortemente incentivati a adottare nuove tecnologie e metodi per far fronte alla gestione delle sfide di operatività. Il Building Information Modeling (BIM) è considerato uno tra gli approcci innovativi necessari ad ottenere un significativo miglioramento della produttività, sia in termini qualitativi che quantitativi. [46,66]. I numerosi vantaggi del BIM sono stati segnalati da diversi progetti di ricerca e case studies concentrandosi su una migliore visualizzazione e comunicazione, ma soprattutto su una adeguata gestione dalla progettazione iniziale alla costruzione, e per tutto il ciclo di vita dell'edificio. [47-50]. Il termine BIM è diventato popolare dopo il 2002 e la sua adozione nel settore ha visto prima di tutto l'interesse dei governi e delle organizzazioni dei clienti per raggiungere obiettivi di miglioramento produttivo, unito alle attività di marketing delle software-house per la vendita di strumenti dotati di implementazione digitale 3D [51-52]. Il tema presenta un'area di ricerca e sperimentazione che si è sviluppata negli ultimi decenni, principalmente riconosciuta sotto altre denominazioni legate alla modellazione per edifici [53-56]. Oggi l'industria delle costruzioni sta passando gradualmente da disegni CAD 2D su supporto cartaceo a modelli digitali 3D orientati agli oggetti, guidati dall'applicazione del BIM e dalle innumerevoli possibilità offerte dai diversi programmi di modellazione digitale. Dal 2011, il Regno Unito è diventato il paese leader nei processi BIM in Europa, e rappresenta un punto di riferimento mondiale per l'utilizzo di tale metodologia di lavoro. Uno dei cardini alla base delle politiche inglesi, poi condiviso in gran parte delle norme sul BIM di diversi Paesi, è rappresentato dal grafico sui BIM Levels di Mark Bew (figura 16). Il cosiddetto livello di maturità per l'adozione del BIM determina il grado di efficienza nell'implementazione della tecnologia e del processo collaborativo e multidisciplinare all'interno di un ambiente di progetto. La maturità BIM di livello 0 rappresenta la realizzazione e la conduzione di progetti/asset basata su informazioni bidimensionali (2D), essenzialmente su supporto cartaceo, con possibili inefficienze. Il livello 1 invece, affronta le procedure su ambiente CAD utilizzando rappresentazioni grafiche 2D e 3D delle informazioni geometriche sull'edificio. Il contenuto informativo a livello 1 viene creato utilizzando approcci standardizzati e archiviato in formati standard che possono essere scambiati tra le diverse applicazioni CAD. La maturità di livello 2 rappresenta il lavoro gestito su ambiente BIM che contiene modelli intelligenti tenuti suddivisi in discipline separate (modelli disciplinari), condivisi e coordinati utilizzando un approccio strutturato su CDE (Common Data

Enviroment) e integrati utilizzando un software middleware proprietario o su misura per la progettazione, per le analisi o il controllo. Infine, Il BIM di livello 3 rappresenta il BIM pienamente integrato e collaborativo abilitato dai servizi Web per le informazioni di costruzione collaborativa, utilizzando standard aperti per favorire l'interoperabilità e l'estensione delle applicazioni BIM alla gestione del ciclo di vita dei progetti di costruzione [61].

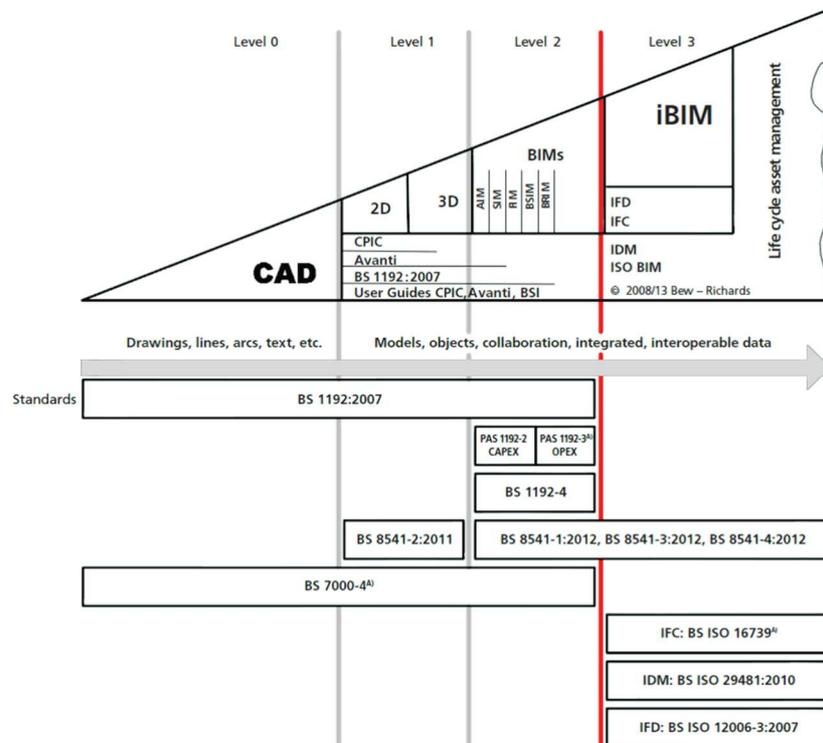


Figura 16: Grafico sui Livelli BIM di Mark Bew [61]

3.1-Stato dell'arte e definizioni del Building Information Modeling

La ricerca bibliografica sullo stato dell'arte, ha evidenziato che il BIM ha assunto differenti definizioni nel corso degli anni e che la sua comprensione varia tra i diversi professionisti del settore. Il BIM è definito e presentato come tecnologia, o un processo o una combinazione di entrambi in una nuova metodologia per attivare un cambiamento di paradigma nel funzionamento del settore delle costruzioni, Una prima descrizione del modello virtuale dell'edificio fu proposta in una nota pubblicazione di Charles M. Eastman nel 1974, oggi riconosciuta come una delle autorità leader mondiali nel settore [57]. Questa descrizione è stata successivamente specificata in un articolo pubblicato nel 1975 evidenziando che l'uso del computer può aiutare gli utenti a visualizzare le informazioni geometriche e non geometriche dell'edificio dando la possibilità di concepire, progettare e simulare [58,59]. Sebbene le definizioni di BIM siano innumerevoli come mostra Bilal Succar [60], esso consente di creare un modello 3D, costituito da informazioni multidisciplinari, offrendo l'opportunità di condividere

informazioni su architettura, materiali, sostenibilità, struttura, strutture e contesto [62,63]. La software-house Autodesk, offre la più basilare definizione incentrata esclusivamente sugli aspetti di modellazione, ovvero, un Building Information Model è una rappresentazione 3D delle caratteristiche fisiche e funzionali di un edificio durante il suo ciclo di vita. Ad esempio, in un modello di informazioni sugli edifici, una finestra di determinati materiali e dimensioni è ospitata digitalmente in un muro, anche esso, di determinati materiali e dimensioni in base a regole parametriche. Qualsiasi modifica dei componenti dell'edificio viene immediatamente coordinata con tutte le viste associate del modello digitale che possono essere utilizzate come risorsa di conoscenza per estrarre varie viste, report e dati affidabili per l'analisi funzionale dell'edificio [51]. Un'altra definizione formale di BIM è presentata da NIBS (National Institute of Building sciences 2007) dove "Building Information Model è una rappresentazione digitale delle caratteristiche fisiche e funzionali di una struttura e una risorsa di conoscenza condivisa che costituisce una base affidabile per le decisioni durante il suo ciclo di vita". Kymmell [64] ha spiegato il BIM come uno strumento o processo o prodotto in grado di generare modelli digitali intelligenti collegati altri strumenti di gestione del progetto (ad es. pianificazione, BOQ, stima dei costi) che facilitano l'ottimizzazione della progettazione, la fattibilità e la collaborazione delle informazioni per tutte le parti interessate. La visione di processo del BIM è supportata da un gran numero di autori che lo dichiarano molto più di una semplice tecnologia per la rappresentazione grafica digitale. Jernigan [65] ha affermato che l'I nell'acronimo BIM, ovvero l'informazione, è il fulcro del processo, dove esistono le opportunità e i valori per il successo del progetto. Per questa ricerca il BIM è definito come una tecnologia di modellazione 3D associata ad un processo di produzione digitale dei dati geometrici e informativi, in grado di identificare il manufatto in tutte le sue caratteristiche distintive.

3.2-La trasformazione come questione culturale

L'industria delle costruzioni sta operando da decenni con formati Computer-Aided Design (CAD) utilizzando una serie di strumenti in grado di produrre buone rappresentazioni dei progetti. Pertanto, le società e le istituzioni meno informate esitano ad accettare l'utilizzo di sistemi di digitalizzazione BIM non trovando differenze sostanziali con i tradizionali modelli CAD, rendendo il processo di assorbimento nell'edilizia molto lento nei confronti dello sviluppo dei mercati [67; 68]. La differenza chiave risiede nella natura orientata agli oggetti dei modelli BIM [54,64] che consente connessioni intelligenti e manipolazione delle informazioni. I disegni CAD tradizionali non hanno alcunché di fisico, pertanto, forniscono solo una rappresentazione di linee, archi, elementi bidimensionali che hanno senso solo a seguito dell'interpretazione umana e non sono possibili applicazioni di calcolo automatizzato, analisi o gestione. [70].

Man mano che un progetto passa dall'idea alla progettazione, costruzione e consegna, le informazioni nei disegni CAD e nei modelli CAD 3D diventano obsolete e riaggiornarle nel corso di vita dell'edificio risulta inverosimile. Dall'altra parte invece, i modelli BIM sono considerati intelligenti rendendo il procedimento di aggiornamento immediato ed automatico in qualsiasi momento, riducendo a zero l'errore umano. Tutte le informazioni 2D e 3D inserite sono automaticamente e costantemente sincronizzate riproducendo un progetto informativo completo e coordinato dopo ciascuna modifica. Inoltre, la modellazione per oggetti contiene tutte le informazioni necessarie per una qualità e una quantità non solo grafica, ma anche in termini di computo di materiali, qualità di materiali, e informazioni necessarie alle simulazioni strutturali o energetiche. Eastman et al., [53] ha spiegato che i seguenti modelli 3D non possono essere classificati come modelli BIM, se:

- I modelli contengono solo dati geometrici ma non possono fornire o supportare l'integrazione e l'analisi dei dati.
- Definire gli oggetti per forma senza supportarne i comportamenti (come regolare le posizioni e le relazioni dei componenti).
- I modelli consentono modifiche alle dimensioni in una vista ma non nelle altre.

Un vero strumento BIM ha un database integrato in cui i dati sono il modello unico di progetto e i report del database sono le query o le viste del modello. Pertanto, tutte le viste in pianta, di sezione, prospetti, callout, prospettive; sono interrogazioni del modello centrale, e possono essere generate automaticamente in qualsiasi momento. I team di progetto lavorano in silos disciplinari (architettura, strutture, impianti) che sono entità separate e funzionano indipendentemente in ogni fase di un progetto [69]. Pertanto, quando i progressi del progetto vanno dalla progettazione concettuale all'ulteriore sviluppo, le informazioni nei modelli CAD tradizionali vengono trasferite separatamente e non possono essere integrate per creare un unico punto di verità, limitando notevolmente la collaborazione tra i partecipanti al progetto. Inoltre, la pratica dei processi tradizionali ha dimostrato che avere un notevole numero di documenti, disegni, versioni di disegni e storie di cambiamenti, rappresenta una situazione difficile da gestire e conservare nel tempo. Ciò si traduce ulteriormente in comunicazione problematica, scarsa procedura di coordinamento, errori e informazioni duplicate, vedi figura 17 [69,43]. Al contrario, i flussi di lavoro BIM migliorano tale approccio, basandosi sul concetto di integrazione e collaborazione che consente ai team di progetto di visualizzare e risolvere i problemi di progettazione durante l'intero processo di lavoro seguendo flussi simultanei e paralleli (figura 18) portando a minori cambiamenti in corso d'opera.

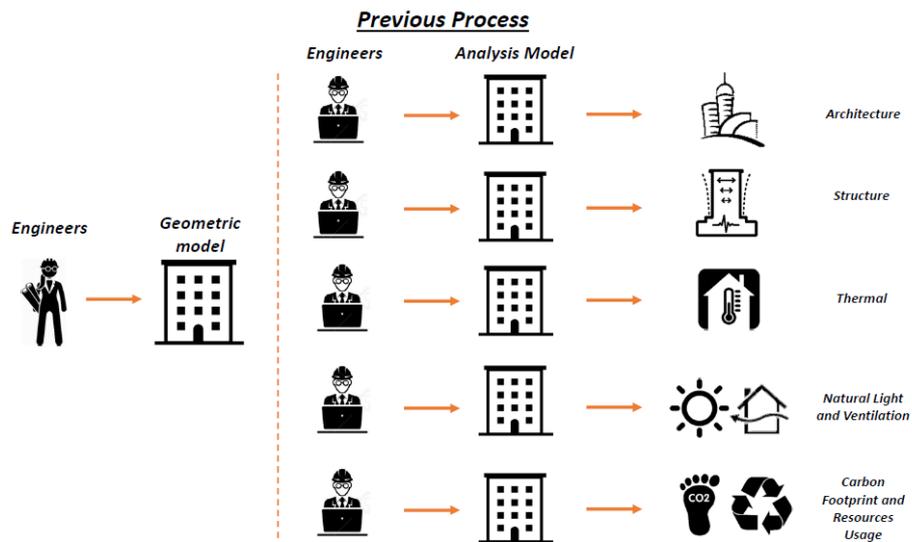


Figura 17: Schema dei flussi tradizionali

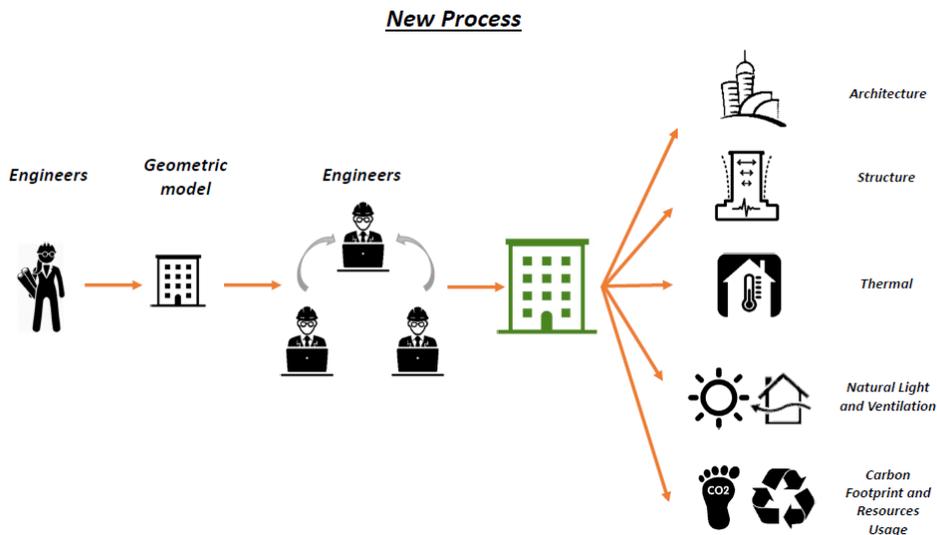


Figura 18: Schema dei flussi integrati

In sintesi, le pratiche CAD tradizionali utilizzano la tecnologia in modo isolato, ma i processi BIM utilizzano la tecnologia per supportare il lavoro collaborativo. La gestione, il coordinamento e la modellazione dei flussi informativi, rappresentano quindi la piena collaborazione per il raggiungimento dello stesso obiettivo, in quanto la gestione necessita di un flusso informativo che rappresenta l'inevitabile conseguenza di una modellazione informativa. Si può pertanto concludere che la progettazione 3D di un modello informato, rappresenta il principale punto di inizio per una corretta gestione dei dati e delle informazioni (figura 19). Il CIFE (Centre for Integrated Facilities Engineering) della Stanford University ha condotto un'analisi esaminando i

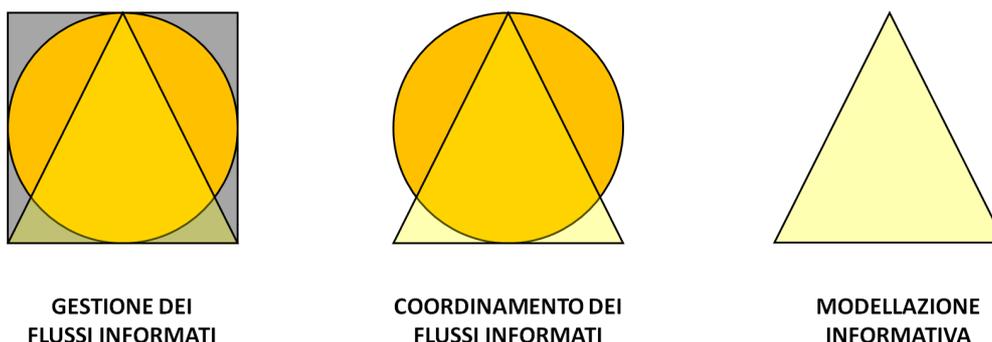


Figura 19: La gestione, il coordinamento e la modellazione dei flussi informativi

vari professionisti del settore coinvolti in una commessa, sintetizzando gli importanti benefici che possono essere tratti utilizzando un modello BIM.

Essi calcolano che il BIM può offrire:

- L'eliminazione fino al 40% di cambiamenti non preventivati
- Una riduzione fino al 80% del tempo richiesto per generare un preventivo di spesa
- Una stima dei costi accurata con margine di errore non oltre il 3%
- Un risparmio fino al 10% del valore del contratto attraverso l'eliminazione di divergenze
- Una riduzione del 7% dei tempi per il progetto

3.3-Il quadro normativo di riferimento

Allo stato attuale l'Italia è soggetta principalmente a normative di diverso tipo, quali:

- Normative ISO: norme tecniche organizzate a livello mondiale.
- Normative CEN: norme (EN) redatte a livello europeo in collaborazione con enti nazionali e internazionali come ISO.
- Normative UNI: norme di giurisdizione italiana, in conformità con le norme dei livelli superiori.

La normativa internazionale di riferimento per il BIM è la ISO 19650 – “Organizzazione delle informazioni sui lavori di costruzione – Gestione delle informazioni nell'uso del BIM” pubblicata sul finire del 2018, che attraverso il meccanismo di adozione diretta del Vienna Agreement diviene norma europea (EN) e nazionale per ciascun stato membro nel corso del 2019. Per l'Italia UNI EN ISO 19650-1 e UNI EN ISO 19650-2:2019 (in italiano ed in inglese). A quest'ultima si aggiunge in funzione di allegato nazionale, la norma UNI 11337 che viene adottata unitamente alla normativa internazionale.

3.3.1 ISO 19650

La ISO 19650 – “Organizzazione delle informazioni sui lavori di costruzione – Gestione delle informazioni nell’uso del BIM” è articolata in due parti:

Parte 1: Concetti e principi (“Concepts and Principles”);

Parte 2: Fase di progettazione e produzione dei beni immobili (“Delivery phase of the assets”)

Durante il 2020 è prevista l’entrata in vigore anche delle parti 3 e 5:

Parte 3: Fase di gestione e manutenzione dei beni immobili (“Operation phase of assets”)

Parte 5: Specifiche per il BIM orientato alla sicurezza, ambienti digitali costruiti, gestione efficiente dei beni immobiliari

3.3.2 UNI 11337

La norma stabilisce i requisiti relativi all’attività professionale delle figure coinvolte nella gestione e nella modellazione informativa (figura 20). Tali requisiti sono identificati con la suddivisione tra compiti e attività specifiche svolte dal professionista in termini di conoscenza, abilità e competenza, secondo il quadro europeo delle qualifiche (EQF). I requisiti sono indicati sia per consentire la valutazione dei risultati sia ai fini di valutare la conformità delle competenze.

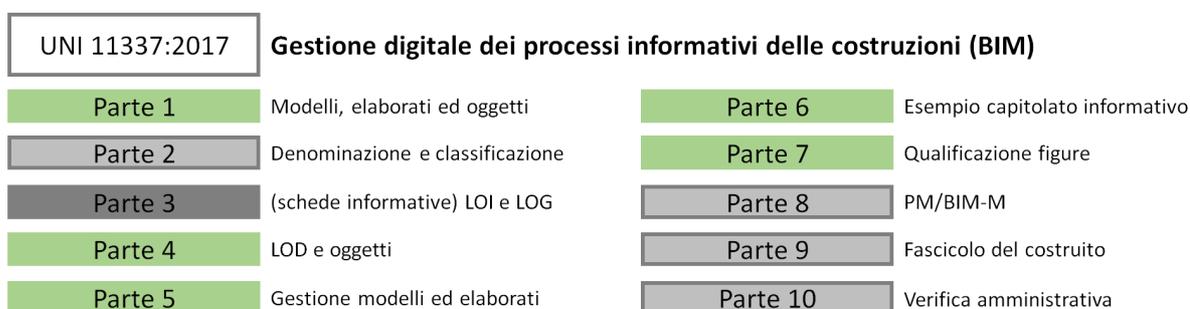


Figura 20: Le principali parti della norma UNI11337

3.3.3 D.lgs. n. 50/2016

Il decreto 1° dicembre 2017, n. 560 stabilisce le modalità e i tempi di progressiva introduzione dei metodi e degli strumenti elettronici di modellazione per l’edilizia e le infrastrutture.

In attuazione dell’articolo 23, comma 13, del decreto legislativo 18 aprile 2016, n. 50, “Codice dei contratti pubblici”, il Ministro delle Infrastrutture e dei Trasporti ha adottato il decreto n. 560 del 1 dicembre 2017 che definisce le modalità e i tempi di progressiva

introduzione, da parte delle stazioni appaltanti, delle amministrazioni concedenti e degli operatori economici, dell'obbligatorietà dei metodi e degli strumenti elettronici specifici, quali quelli di modellazione per l'edilizia e le infrastrutture, nelle fasi di progettazione, costruzione e gestione delle opere e relative verifiche (tabella 6).

Tabella 6 - Modalità e tempi di introduzione del BIM. Decreto n. 560 del 1° dicembre 2017

Entrata in vigore	Tipologia di lavori, importi
1 Gennaio 2019	Per lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara pari o superiore a 100 milioni di euro
1 Gennaio 2020	Per lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara pari o superiore a 50 milioni di euro
1 Gennaio 2021	Per lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara pari o superiore a 15 milioni di euro
1 Gennaio 2022	Per lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara pari o superiore alla soglia di cui all'art. 35 del codice dei contratti pubblici
1 Gennaio 2023	Per lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara pari o superiore a 1 milione di euro
1 Gennaio 2025	Per lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara inferiore a 1 milione di euro

Pertanto, entro il 2025, è prevista la piena adozione dei processi di digitalizzazione BIM.

3.4-Gli standard geometrici e informativi

Il capitolo della norma UNI 11337-4 interessa gli aspetti qualitativi e quantitativi della gestione digitalizzata del processo informativo nel settore delle costruzioni, a supporto del processo decisionale.

Il modello, gli oggetti e gli elaborati informativi hanno carattere strumentale al raggiungimento degli obiettivi; con lo scopo di:

- definire una scala comune di livello di sviluppo informativo degli oggetti relativi ai modelli;
- definire una scala comune di stati di lavorazione e di approvazione del contenuto informativo.

La presente norma è applicabile a qualsiasi tipologia di prodotto (risultante) di settore (sia esso un edificio, una infrastruttura, un intervento territoriale – ad esempio un bacino, una scogliera, ecc.) e a qualsiasi tipologia di processo (di ideazione, di produzione o di esercizio), per interventi di nuova costruzione e di conservazione, demolizione e/o riqualificazione dell’ambiente o del patrimonio costruito (figura 21).

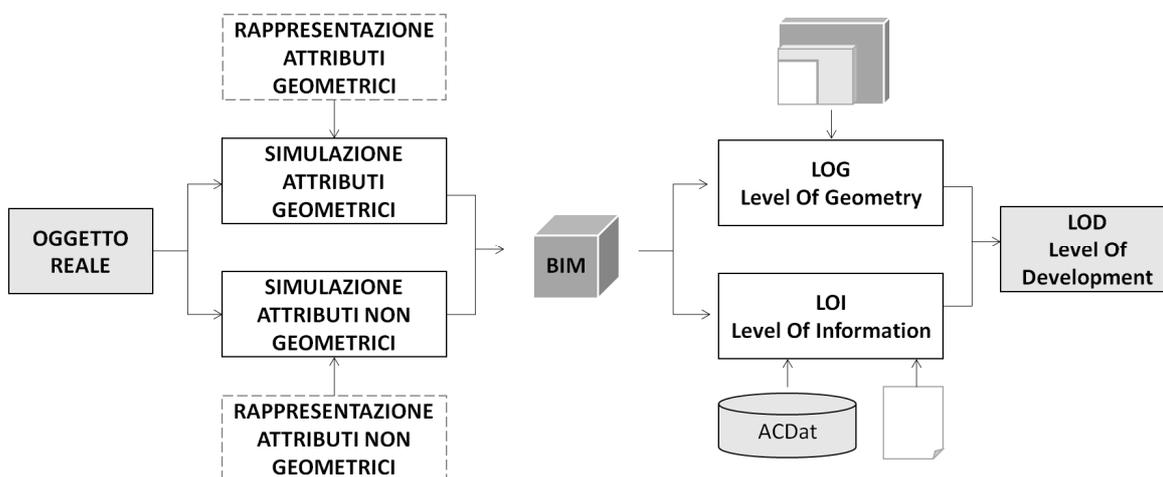


Figura 21: Schema rappresentativo del livello di sviluppo del BIM

Come l’oggetto reale è costituito da attributi fisici e geometrici, così l’oggetto BIM può essere considerato un insieme di geometria e informazione. Entrambi questi aspetti sono rappresentati da livelli di dettaglio differenti, in funzione della fase progettuale in cui si inseriscono. È definito LOG, (Livello di sviluppo degli Oggetti - attributi Geometrici), ed è definito LOI (Livello di sviluppo degli Oggetti - attributi Informativi). L’insieme dei dati costituisce il complessivo LOD, livello di sviluppo dell’oggetto BIM, definito come:

- LOD A - oggetto simbolico;
- LOD B - oggetto generico;
- LOD C - oggetto definito;
- LOD D - oggetto dettagliato;
- LOD E - oggetto specifico;
- LOD F - oggetto eseguito;
- LOD G - oggetto aggiornato.

I LOD italiani prendono spunto da quelli USA ma integrano alcuni aspetti UK e risentono di altre prerogative tipicamente nazionali, importanti per il nostro mercato.

3.5-Le Dimensioni BIM

Un Building Information Model è un modello 3D orientato agli oggetti che ha varie applicazioni e usi in diverse fasi del progetto e su diverse discipline. Per questo, il

processo BIM è definito come ndimensionale, ovvero dotato di ndimensioni in grado di estendere le applicazioni del BIM durante l'intero ciclo di vita del progetto. Queste dimensioni sono brevemente spiegate nei seguenti punti (figura 22).

- **2D:** ovvero l'estrapolazione di dati a partire dal modello BIM 3D, il quale può essere utilizzato per generare disegni 2D e documenti excel [51].
- **3D:** ovvero modelli orientati agli oggetti con informazioni integrate intelligenti, semantiche, funzionali e sulle prestazioni che possono essere utilizzate per la visualizzazione, il computo, il rilevamento di conflitti, l'interrogazione di progetti e le analisi.
- **4D:** ovvero l'associazione temporale o Pianificazione. Associando alla geometria i tempi di esecuzione o realizzazione, viene generato un Gantt dei lavori. Si definisce come modalità 4D e può essere utilizzata per simulare l'assemblaggio della produzione e il monitoraggio dei progressi [75].
- **5D:** l'aggiunta di informazioni sui costi e sul budget a un modello BIM si chiama modellazione 5D grazie alla quale è possibile generare computi e valutare una stima automatizzata per la gestione dei costi [76].
- **6D:** implica l'inserimento di tutte le informazioni utili legate alla gestione della struttura (quali ad esempio, il costruttore, il produttore, la ditta, l'anno di installazione degli impianti, l'anno di manutenzione, e così via). Mantenere i dati e le informazioni nel tempo consente di avere un modello digitale costantemente aggiornato durante tutto il ciclo di vita dell'edificio.
- **7D:** il modello contiene informazioni energetiche e sulla sostenibilità dell'edificio di riferimento. Grazie alle informazioni inserite possono essere lanciate simulazioni prestazionali in fase concettuale o in fase avanzata esportando i dati verso software specifici di analisi.
- **Possibili nD BIM:** è un modello teorico il quale indica che le applicazioni del modello BIM sono numerose e possono raggiungere qualsiasi numero di dimensioni in futuro.

Questo studio si concentra sulla ricerca e sull'approfondimento della settima dimensione energetica, concentrandosi principalmente sulle applicazioni nelle analisi di simulazione dinamica. Sulla base della multidimensionalità e quindi dell'interdisciplinarietà, un modello BIM completamente coordinato e funzionale può essere utilizzato per una serie di applicazioni in tutte le fasi del ciclo di vita di un progetto.



Figura 22: Le dimensioni del BIM

Le sue applicazioni dipendono da diversi fattori concomitanti, quali la natura del progetto, la collaborazione all'interno dell'ambiente di lavoro e l'esperienza tecnica degli specialisti del settore. Questo permette ai proprietari e/o gestori di grandi patrimoni immobiliari di poter gestire meglio analisi e processi decisionali, effettuare un'approfondita indagine sull'effettivo stato del portfolio tecnologico disponibile, e fare opportune valutazioni sulle esigenze, per implementare scelte strategiche e dinamiche di best practice per la corretta gestione del patrimonio. È il quadro di quello che avviene all'interno delle pubbliche amministrazioni, in cui il tema della digitalizzazione del patrimonio immobiliare diventa sempre più attuale. Se si considera che, lungo l'intero ciclo di vita di un immobile, i costi di gestione sono quelli che impattano maggiormente su costi e bilanci, la fase di sviluppo di un immobile occupa soltanto un 10% di peso temporale rispetto alla restante fase di esercizio, considerandola in termini di vita economica di un bene.

3.6-Paradigmi complementari

La gestione informativa degli edifici rappresenta il punto di svolta verso il progresso digitalizzato, grazie alla sua capacità di soddisfare le esigenze tecnologiche delle generazioni future. Tuttavia, è ingenuo credere che da solo possa produrre totali cambiamenti. Le ricerche dimostrano che, se associato ad altri paradigmi, esso può imprimere la spinta necessaria per un cambiamento radicale, come ad esempio per i temi e i principi di progettazione integrata, sostenibilità e Smart city (figura 23).

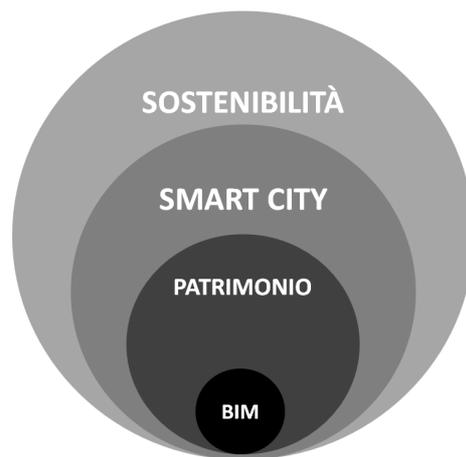


Figura 23: I paradigmi del progresso digitalizzato

Le interconnessioni tra paradigmi sono molto evidenti, come dimostrato dal rapporto pubblicato nel 2013 nel Regno Unito dalla Commission for Employment and Skills, importante avere una visione olistica che consideri il “tutti per uno”, e non “l’uno alla volta” [71] per assicurare il raggiungimento di soluzioni ottimali. Un approccio progettuale integra persone, sistemi, strutture aziendali e prassi in un processo capace di sfruttare in modo collaborativo i talenti e le conoscenze di tutti i partecipanti per ottimizzare i risultati del progetto, ridurre gli sprechi e massimizzare l’efficienza in tutte le fasi di progettazione, fabbricazione e costruzione”. (Integrated project delivery: A guide: Version 1, AIA, 2007) [72]. Il BIM è uno degli strumenti/processi più potenti a supporto della progettazione integrata, ottimizzando il coordinamento, la collaborazione e la comunicazione all’interno del team di progetto. Grazie a questo tipo di analisi, oggi è possibile progettare, costruire e mettere in opera minimizzando l’impatto ambientale e ottenendo miglioramenti in termini di efficienza energetica ed uso efficace delle risorse. Infatti, già nelle fasi iniziali del ciclo di vita del progetto possono essere prese decisioni basate sull’analisi permettendo al team di lavoro di ricercare soluzioni progettuali sostenibili. Ma di particolare innovazione troviamo la possibilità del BIM di non limitarsi ad un singolo edificio, ma di essere utilizzato per sviluppare modelli informativi legati al livello urbano. Questi modelli possono diventare le basi del “DNA” digitale delle smart city con dimensioni spaziali, fisiche, digitali, commerciali e sociali, collegando il modello della città a dati geospaziali, sensori, e dati statistici.

Condivisione Cloud

La potenza del BIM da sola è limitata da fattori che dipendono dalle capacità dell’uomo, dai processi e dalle tecnologie, per questo motivo dedicarsi ad uno solo di questi limiti aiuta ad investire nella buona riuscita dell’obiettivo [73]. In particolare, sfruttare

persone e processi per il miglioramento sul fronte tecnologico, fa sì che le nuove tecnologie sosterranno le mancanze dell'uomo e dei processi sui fronti dei flussi informativi. Ed è il caso del cosiddetto Cloud Computing, piattaforme Cloud create a supporto della progettazione e della gestione, in grado di migliorare le modalità di applicazione e uso del BIM nei processi di condivisione delle risorse. Il National Institute of Standards and Technology (NIST) negli USA definisce: "un modello per consentire facilmente l'accesso, tramite la rete, a un pool condiviso di risorse rapidamente predisposte e rilasciate con minimo sforzo gestionale". In altre parole, una piattaforma che migliora il processo collaborativo sfruttando le funzionalità web del BIM, non solo per gli attori del processo ma anche per gli utenti finali, realizzando il cosiddetto paradigma "informazioni sempre e ovunque". Tali tecnologie, sono considerate totalmente all'avanguardia, permettendo inoltre l'accesso a modelli da remoto utilizzando dispositivi mobile. Un modello analitico strutturale di un edificio, un modello energetico, un modello gestionale estratto dal BIM, può essere analizzato cloud-base da qualunque persona con connessione internet. Queste modalità di approccio avranno un enorme impatto sul futuro della gestione patrimoniale territoriale. Ad oggi, il settore immobiliare costituisce un insieme di dati di largo spettro – a partire dall'ufficio di commessa, allo studio del progettista, presso il cantiere edile, nella fabbrica di un'azienda manifatturiera, nel database di un fornitore o nelle banche dati di censimento. Non esiste un modo per tenere traccia facilmente, o avere accesso in tempo reale a questi dati nel corso dell'evoluzione del processo. I cosiddetti "Big data" possono essere archiviati in un database cloud, ai quali tutti possono attingere, governi, associazioni, aziende, professionisti, utenti [74]. Una piattaforma BIM può essere collegata a una grande quantità di dati, migliorando il potere decisionale (figura 24).



Figura 24: La gestione dei dati Cloud

La diffusione del BIM nel settore delle costruzioni può avere un enorme impatto sul prossimo futuro, facilitando la memorizzazione dei dati sul patrimonio costruito e tecnologico, espandendo la capacità di gestione e archiviazione, di amministrazioni, ministeri delle organizzazioni.

CAPITOLO 4: LA MODELLAZIONE INFORMATIVA FINALIZZATA ALL'EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI_I CASI STUDIO

L'edificio è un sistema complesso caratterizzato da numerosi fenomeni energetici che si sviluppano al suo interno e che si trovano in relazione continua tra di loro. Le caratteristiche dell'involucro (pareti, pavimenti, finestre), i sistemi (riscaldamento, raffreddamento, elettricità), la destinazione d'uso (residenze, uffici, hotel, ecc.), la presenza di persone o macchine che producono calore, richiedono strumenti di simulazione avanzati che consentono la corretta valutazione dei fenomeni termo-fisici. Grazie alle nuove tecnologie nel campo della progettazione e simulazione, è possibile raggiungere gli obiettivi sopra menzionati attraverso soluzioni altamente efficienti [77,78]. Nel corso degli anni, i professionisti di AEC hanno dovuto affrontare numerose sfide, trovandosi di fronte a nuovi metodi per agire in un mercato che offre varietà di strumenti e competenze da parte degli utenti. La simulazione dinamica è l'unico metodo che permette di analizzare con precisione e affidabilità le prestazioni energetiche di un edificio nel tempo. Il mercato ha portato a una varietà di strumenti di simulazione validati scientificamente e a livello internazionale, e negli ultimi anni, la gamma di programmi energetici è stata migliorata per essere utilizzata in tutta la comunità energetica degli edifici [79,80]. L'utilizzo di software di simulazione delle performance dell'edificio (BPS) per assistere con successo il processo di progettazione si ottiene da una valutazione completa delle opzioni decisionali in funzioni delle condizioni realistiche dell'edificio. Questa valutazione migliora ulteriormente se viene soddisfatta la richiesta di un'adeguata comunicazione e condivisione dei dati tra i vari professionisti in ogni fase del processo di progettazione. Le tecnologie relative al Building Information Modeling (BIM) hanno ottenuto l'accettazione come strumenti preziosi per migliorare la progettazione e la costruzione di edifici migliorando l'interoperabilità e l'integrazione dei dati. La digitalizzazione consente di avere un "deposito informativo più ricco" che trova ampio riconoscimento nel settore dell'edilizia e delle costruzioni, suscitando ulteriore investigazione riguardo alle sue applicazioni per lo sviluppo della sostenibilità energetica. Il processo consente l'uso dei dati disponibili dal modello architettonico per ottenere informazioni necessarie a creare un Building Energy Model (BEM), risparmiando tempo di ricostruzione del modello e accelerando così la progettazione, consentendo al contempo più iterazioni prestazionali. Il termine utilizzato comunemente per identificare tale procedura di trasmissione è identificata nel mondo accademico come "BIM-BEM" [81-83]. I progetti sono caratterizzati da un equilibrio tra processo e tecnologia in cui il modello BIM architettonico è condiviso per la generazione del BEM, completando le analisi con i BPS, al fine di ridurre i rischi di divergenza, errori e incomprensioni. BIM-BEM deve quindi essere supportato da innovazioni tecnologiche

per aiutare la condivisione e la visualizzazione di idee in formato 3D virtuale. Ciò è possibile con il modello di edificio intelligente, o modello digitale, che definisce le relazioni funzionali, strutturali e comportamentali tra elementi differenti, supportando le verifiche e le personalizzazioni automatiche. Tuttavia, il tema BIM-BEM è ancora caratterizzato da problemi e sfide pertinenti ai processi di progettazione e agli approcci tecnologici disponibili. Questa ricerca, si concentra sull'implementazione delle interazioni unidirezionali da BIM a BEM durante il processo di progettazione, di conseguenza, i processi operativi e di ottimizzazione che richiedono feedback dal BEM al BIM non rientrano nell'ambito di ricerca.

4.1-Interoperabilità con gli strumenti di simulazione delle performance degli edifici - lo stato dell'arte

Un processo di progettazione di edifici ad alte prestazioni contiene una serie di attività e decisioni che devono essere prese dai professionisti in ogni fase di progettazione [84]. Heap-Yih Chong et al. [58] rivedendo gli standard e le linee guida del BIM, conclude come l'adozione del Bim nel settore AEC possa migliorare il lavoro collaborativo ambientale e la sostenibilità sociale. In questo modo, l'analisi della sostenibilità è perfettamente integrata fin dall'inizio del processo di progettazione [59]. È quindi evidente l'importanza di trovare soluzioni energetiche ottimali nella fase decisionale del processo di costruzione e quindi evidenziare il forte impatto delle decisioni di progettazione sulle prestazioni e sui costi energetici [60]. Investire per migliorare le procedure del processo di progettazione offre possibilità di iterazioni per ottenere una progettazione ottimizzata in un ambiente comune e condiviso. Attualmente sono disponibili diverse linee guida per l'esecuzione di progetti BIM che propongono flussi e processi, come quelli proposti da Eastman et al. [54], o Solnosky [85], o CIC [114], tuttavia, queste linee guida coprono solo in parte la procedura di integrazione al modello energetico. Pochi studi descrivono specificamente la procedura di trasmissione dei dati BIM-BEM, questo perché rivestono temi attuali e ancora in via di sviluppo. Koppinen e Kiviniemi [86] e Korkmaz et al. [87] propongono una descrizione del processo di progettazione per BIM-BEM, compresi i punti di decisione critici, i requisiti e le fonti di informazione per ciascuna fase di progettazione. Allo stesso modo, Wong e Fan [88], Attia et al. [89] e Lee [90] descrivono le informazioni richieste per le diverse fasi di progettazione per realizzare un edificio ad alte prestazioni. L'integrazione dell'informazione e l'interoperabilità tra i diversi strumenti BIM e BEM è la parte più difficile del processo. Come definito negli studi condotti da Negendahl [91] e Toth, Janssen [92], esistono tre metodi per l'integrazione dei modelli:

- metodi combinati

- centrali
- distribuiti

Il metodo combinato richiede che venga prodotto contemporaneamente un pacchetto software specifico che supporti sia la progettazione sia la simulazione energetica. I modelli combinati sono manipolati e simulati solo da un professionista ibrido. Ciò facilita il monitoraggio dell'accuratezza del modello per tutte le fasi di progettazione e simulazione energetica; d'altra parte, crea limitazioni che devono essere applicate dalla maggior parte degli strumenti disponibili [93]. Pertanto, pochissimi studi propongono questo metodo per BIM-BEM. Al contrario, il metodo centrale è l'approccio più comunemente usato per i progetti BIM [70]. In questo metodo, le informazioni semantiche possono essere trasferite tra strumenti BIM e BEM attraverso un mezzo di accoppiamento o uno schema di dati come passaggio di interoperabilità. Le forme più note e importanti di schemi di dati utilizzati dal metodo centrale sono gbXML [115] e IFC [68]. Esistono tre tipi di compatibilità software con questi schemi di dati: direttamente compatibile, non compatibile e indirettamente compatibile [94]. La compatibilità diretta (metodo centrale) si ottiene quando esiste un'interfaccia di mappatura tra il modello di dati interno al software e il modello di schema dei dati importato, consentendo di tradurre le definizioni direttamente nello stesso schema semantico. In assenza dell'interfaccia dello schema dati o di qualsiasi traduttore per uno strumento BEM, lo scambio di dati è impossibile, e viene definito Non compatibile. Tuttavia, quando lo strumento BEM non è in grado di tradurre direttamente il formato dello schema di dati o quando non può accettare una particolare versione di un file, è possibile utilizzare un'interfaccia intermedia con la possibilità di scambiare o trasformare i dati del modello (compatibile indirettamente). In questo caso, la soluzione consiste nell'utilizzare il metodo di integrazione del modello distribuito tramite uno o più middleware. Poiché il modello BIM architettonico non riflette necessariamente le esigenze del BEM, l'utilizzo di middleware, che di solito sono un'interfaccia di terze parti (TPI), come gli strumenti di Visual Programming Language (VPL), tra cui Dynamo-BIM [95], Grasshopper [96] o Virtual Design Studio (VDS) [97] permettono di semplificare tutte le informazioni architettoniche non necessarie alle simulazioni energetiche. Inoltre, l'utilizzo del VPL consente di gestire geometrie pesanti e complesse e modelli non geometrici creando e modificando particolari algoritmi per il modello, senza avere alcuna conoscenza professionale della programmazione, sfruttando blocchetti di programmazione già predisposti. A differenza del metodo centrale, l'utilizzo del middleware nel metodo distribuito consente di regolare, ottimizzare e trasformare il modello BIM per la sua interpretazione corretta con lo strumento BEM.

4.2-I Formati di scambio

I formati di scambio dati sviluppati per facilitare l'interoperabilità tra diversi software sono due. Da un lato c'è il formato gbXML sviluppato da Green Building Studio [115], dall'altro l'IFC, che è un formato di file aperto basato su oggetti, sviluppato da buildingSMART [68]. La tabella 7 riporta uno schema delle principali differenze tra i due formati di interscambio.

Tabella 7 – Differenza tra gbXML e i file IFC.

Caratteristica	GbXML	IFC
Formato	XML file	IFC, XML file
Applicazione	Simulazioni energetiche	Diversi scopi
Geometria edificio	Solo geometrie rettangolari	Tutte le geometrie
Zone termiche	Si	Si
Orientamento	Si	Si
Impianti	Si	Si
Normato ISO	Si	No

Green Building eXtensive Markup Language

Lo schema Green Building XML, o più comunemente chiamato gbXML è stato ideato per facilitare il trasferimento delle informazioni degli edifici fra diversi software, che essi siano BIM software o strumenti per analisi specifiche. Lo sviluppo di Green Building XML iniziò nel 1999, finanziato dalla California Energy Commission PIER Program, Pacific Gas and Electric e Green Building Studio. Nel 2009 l'azienda Autodesk acquista Green Building Studio, e nel 2016 venne realizzato Open Studio, ovvero il primo software conforme al formato gbXML. Nel 2019 sono circa 50 i software che supportano il formato gbXML. Il formato gbXML basa il suo funzionamento su quello che in programmazione viene chiamato Extensible Markup Language. Generalmente un file gbXML contiene le informazioni del progetto riguardanti la geometria e le proprietà di quest'ultimo, in particolare:

- Blocchi e zone termiche
- Geo-localizzazione e descrizione dell'edificio
- Proprietà termiche dei materiali
- Stratigrafie delle strutture
- Caratteristiche geometrie e posizione nello spazio delle strutture opache

- Caratteristiche e posizione nello spazio delle strutture trasparenti

Industry Foundation Classes



Figura 25: Lo sviluppo della normativa dell'IFC

Lo standard IFC nasce nel 1994 quando nacquero degli investimenti nella realizzazione di un codice informatico costituito da un insieme di classi C++ “in grado di supportare lo sviluppo di applicazioni integrate” da parte l’Industry Alliance for Interoperability. Dal 2005 ad oggi BuildingSMART International pubblica il proprio operato tramite capitoli nazionali chiamati BuildingSMART (IBIMI è il Capitolo Italiano di buildingSMART) inoltre, sono state recentemente definite degli standard per qualificare le figure professionali in ambito BIM. È importante sottolineare l’accordo fra BuildingSMART International ed ISO avvenuta nel 2013, tramite la norma ISO 16739, la quale stabilisce che ogni aggiornamento allo standard IFC da parte di buildingSMART (figura 25). Ogni stato membro viene influenzato direttamente da questo accordo, in quanto ogni norma ISO viene automaticamente recepita dal CEN, che verificare la non presenza di conflitti fra queste ultime e le norme comunitarie. A seguito dell’accordo di Vienna, ogni norma CEN viene automaticamente recepita dagli stati membri, per mezzo dell’azione di norme nazionali, quindi dell’UNI per quanto riguarda Italia. [68] Lo standard IFC nasce allo scopo di facilitare l’interoperabilità fra i vari operatori nel settore AEC, evitando che in questo passaggio si verificano perdite o modifiche indesiderate dei dati. L’IFC è un formato aperto non proprietario, ovvero non è controllato da un singolo produttore software e il suo campo d’applicazione comprende l’intero ciclo di vita dell’edificio, dalle prime fasi di progettazione fino alla pianificazione della realizzazione ed alla futura manutenzione. BuildingSMART identifica lo standard IFC come il principale strumento per l’interscambio di informazioni in ambito OPEN BIM, definendolo come uno strumento fine ad un “approccio universale alla collaborazione per la progettazione e la costruzione degli edifici basati su standard e flussi di lavoro aperti”.

4.3-I software energetici

Per la letteratura del modello energetico è prassi diffusa affidarsi a strumenti specializzati, che possano interfacciarsi correttamente agli strumenti BIM e che riescano a leggere correttamente i dati, quali:

- Località e clima a cui una struttura è soggetta
- Tipologia di involucro dell'edificio
- Destinazione d'uso e zone termiche
- Impianti e generatori adoperati

Diventa chiaro che l'interoperabilità dei dati assume un aspetto fondamentale. L'edificio moderno, infatti, è soggetto ad una vasta mole di informazioni, che in alcuni casi, come accade spesso per edifici pubblici o industriali, rende indispensabile l'automazione nel trattamento di tali dati. Infatti, la complessità costruttiva e l'elevato livello di prestazioni termiche e di involucro richieste negli edifici contemporanei, portano i professionisti a dover gestire i processi tramite il digitale. L'interoperabilità viene resa possibile attraverso l'utilizzo di formati di scambio non proprietari che le varie softwarehouse considerano nello sviluppo dei propri software [100, 101]. Gli strumenti di simulazione sono costituiti da due diversi elementi, il motore di calcolo e l'interfaccia grafica [102]. Mentre il motore computazionale è di solito sviluppato da uno o più istituti di ricerca, le interfacce grafiche sono spesso implementate dalla softwarehouse per scopi puramente commerciali. Un elenco completo degli strumenti e della descrizione disponibili è pubblicato nella "Directory degli strumenti software per l'edilizia energetica" (U.S. DOE 2007) [103]. Un confronto sui potenziali dei principali software di simulazione di energia dinamica può essere trovato in [102,104,1105,107,108,109], mentre un diagramma rappresentativo dell'evoluzione di questi strumenti dal 1967 fino alla fine degli anni 70- Gli anni '80 sono riportati in [106]. I principali programmi di simulazione energetica dell'edificio, confrontati anche in [79] sono: BLAST, BSim, DeST, DOE-2.1E, ECOTECT, Ener-Win, Energy Express, Energy-10, EnergyPlus, eQUEST, ESP-r, IDA ICE, IES / VES, HAP, HEED, PowerDomus, SUNREL, Tas, TRACE e TRNSYS. Tuttavia, non tutti i software di simulazione hanno entrambe le funzionalità, quindi possono essere suddivisi in quelli che hanno solo un'interfaccia grafica, o solo un motore di simulazione, o entrambe le funzionalità. La figura 26 elenca alcuni dei principali strumenti di simulazione [102,107,111,112]. È da specificare che la valutazione del processo di interoperabilità richiede il controllo sia della lettura dei dati in entrata da parte dei software BEM, che il controllo della corretta scrittura delle informazioni da parte dei software BIM. Per

quanto riguarda il settore energia, l'interoperabilità fra software avviene principalmente in tre modi:

- metodi combinati, es attraverso l'uso di plug-in (modellazione e simulazione nello stesso ambiente di lavoro)
- centrali (interoperabilità attraverso formati di interscambio aperti)
- e distribuiti (interoperabilità per mezzo di terze parti)

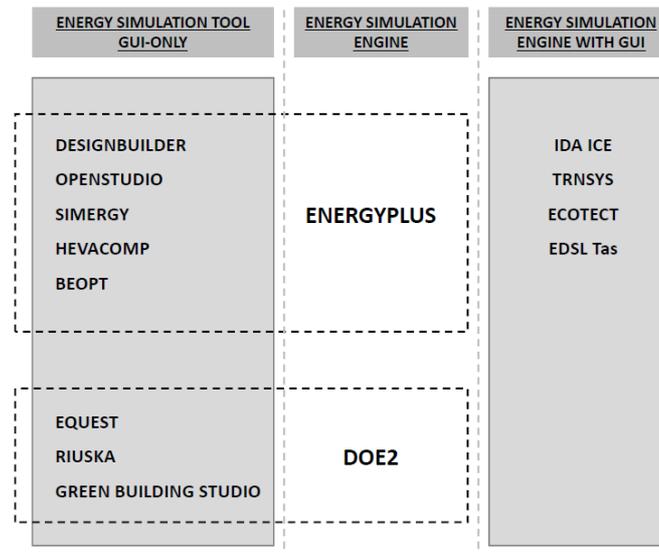


Figura 26: Suddivisione di alcuni strumenti di simulazione energetica

4.4-La costruzione del modello energetico

La geometria dell'edificio rappresenta il primo input di dati per la simulazione energetica, per cui distinguere la differenza tra un modello costruito per uso puramente architettonico o necessario per eseguire un'analisi prestazionale, assume un ruolo fondamentale. Come mostra Georgios Gourlis et al. [113], un modello di simulazione energetica si riferisce alla risoluzione dei fenomeni termici in cui le zone termiche richiedono una precisa condizione al contorno che non è necessariamente la stessa dei modelli architettonici [110,111]. Per questo motivo riuscire a semplificare notevoli quantità di dati architettonici ai fini energetici, può trasformarsi in un primo potenziale limite se non si è in grado di gestire con efficacia il processo di trasmissione e trasformazione. Su questo tema, sono stati analizzati 2 dei casi studio affrontati, il caso test, e il caso semplice, utilizzando alcuni fra i software disponibili sul mercato, scelti in base alle esigenze e alla tipologia della simulazione. L'analisi ha previsto una parte sulle potenzialità degli strumenti legate alla capacità di importare ed esportare file nei formati più utilizzati, quali gbXML e .IFC. e una seconda parte, sulla valutazione del grado di interoperabilità legato alla qualità dei dati letti. I software selezionati sono stati valutati

per step, adottando differenti workflow BIM to BEM in funzione degli scopi di ricerca, riscontrabili nei successivi paragrafi. Inoltre, i risultati sono stati ottenuti per mezzo dello sviluppo di scripting costruiti all'interno di strumenti middleware in grado di migliorare l'interpretazione e la semplificazione dei schemi di dati. La figura 27 riporta lo schema del flusso di lavoro eseguito.

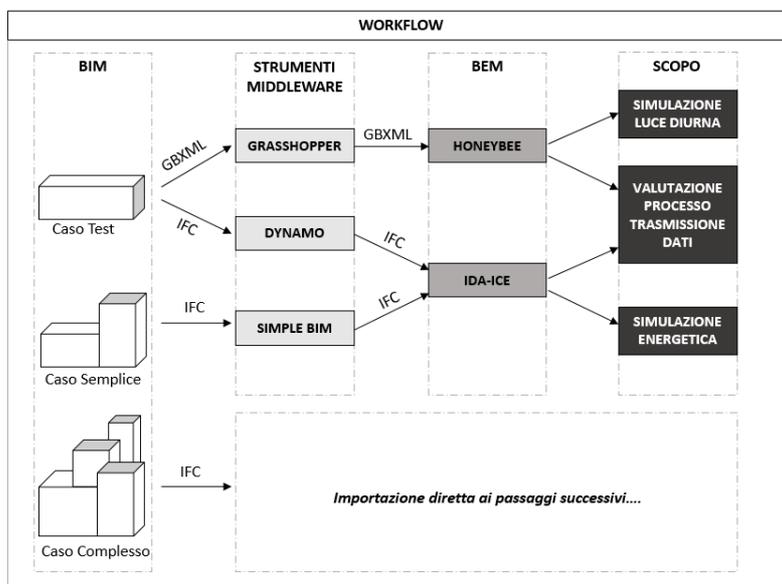


Figura 27: Workflow rappresentativo dei casi studio affrontati nella ricerca

Nel dettaglio, per i casi studio Test e Semplice, sono stati investigati i temi dell'energia e di illuminazione diurna attraverso i due formati di interscambio IFC e gbXML. Per mezzo di strumenti middleware quali Dynamo, Grasshopper e Simple BIM, sono stati raggiunti i software di simulazione Ladybug-Honeybee (con motore energyplus) e IDA-ICE. Lo scopo ultimo è stato quello di valutare il processo sia in termini di trasmissione dati sia in termini di risultati simulativi. Il caso test consiste nella serie 900 descritta all'interno dello standard ANSI/ASHRAE 140-2017 Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. Consiste in test di comparazione tra differenti software di simulazione dinamica e consente l'analisi di sensibilità dei programmi di calcolo ai parametri che influenzano il modello. Per validare quest'ultima analisi, i casi studio importati sono stati confrontati con i risultati ottenuti dai modelli energetici creati direttamente all'interno del software di simulazione. L'ultimo caso studio, il caso complesso, è stato utilizzato per le fasi successive della ricerca. I due casi studio analizzati in questa prima fase, sono riconducibili e tre pubblicazioni presentate:

1. BIM Tools Interoperability For Designing Energy-Efficient Buildings
(Caso 1 - Test-IFC-Valutazione processo di trasmissione)
2. Testing the BIM-Ladybug tools interoperability: a daylighting simulation workflow

(Caso 2 - Test-gbXML-Simulazione illuminazione diurna)

3. BIM-BEM support tools for early stages of zero-energy building design

(Caso 3 - Semplice-IFC-Simulazione energetica)

Nello specifico, la procedura eseguita per ciascun caso studio è riportata nella figura 28. Per prima cosa è stato preparato il modello REVIT architettonico in funzione della successiva trasformazione e preparazione per le analisi energetiche. In questo caso, si ricorda che il BIM è un processo che riveste tutte le fasi di progettazione, fino alla costruzione, gestione e demolizione dell'opera. Di conseguenza, nello scambio dati è riportata la possibilità di provenienza/consegna da possibili fasi precedenti e possibili fasi di progettazione future. Una volta preparato il modello BEM viene trasferito per mezzo di file di interscambio al software di simulazione, dove in primo luogo, avviene un controllo delle informazioni importate. Nel caso in cui queste non siano state ritenute idonee alle analisi, si è provveduto a ripartire dall'ambiente BIM per la corretta preparazione del BEM. Questi studi hanno permesso di trarre delle conclusioni e delle procedure di modellazione idonee alla creazione del modello energetico.

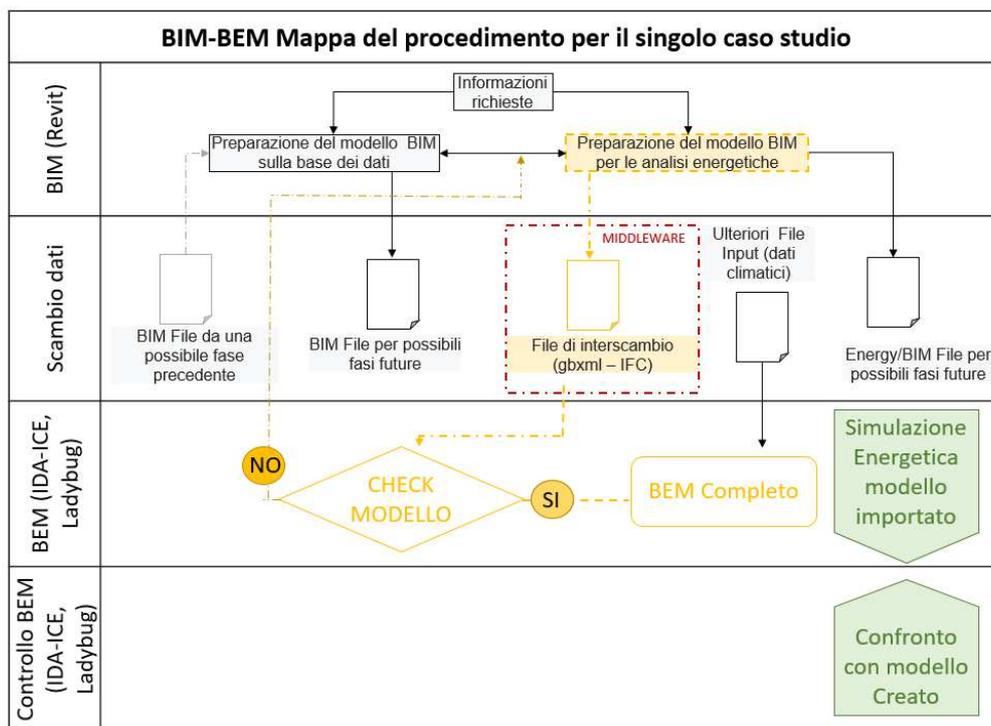


Figura 28: Mappa del procedimento per il singolo caso studio

Una volta che il modello è stato importato correttamente all'interno del software di simulazione, viene dotato di ulteriori input necessari alle analisi. Infine, i risultati ottenuti sono stati confrontati con i risultati derivanti dal modello creato direttamente all'interno del software di simulazione.

4.5-Caso Studio 1: BIM Tools Interoperability For Designing Energy-Efficient Buildings

La complessità costruttiva dell'involucro edilizio comporta l'applicazione di strumenti di modellazione digitale durante i processi di progettazione, inoltre, per ottenere la qualifica NZEB (edificio a energia zero netta), l'uso di strumenti BPS (simulazione delle prestazioni dell'edificio risulta indispensabile. In questo contesto, la presente ricerca presentata alla 74 conferenza ATI [134], mira ad analizzare il potenziale di interoperabilità offerto dal software basato su metodologia BIM (Building Information Modeling) al fine di ottimizzare la fase di modellazione e migliorare i risultati della simulazione energetica. La ricerca mostra i vantaggi e gli svantaggi legati all'adozione di un flusso di lavoro implementato a partire da Autodesk Revit fino alla simulazione energetica in ambiente IDA-ICE, mediante uno strumento di programmazione algoritmica visiva Dynamo-BIM. Il caso di studio dell'ASHRAE è stato considerato come sistema di riferimento per testare e verificare l'ottimizzazione del processo effettivo. I risultati identificano quale sia l'insieme di informazioni corretto necessario per l'analisi energetica al fine di ottenere risultati di simulazione energetica adeguati con perdite minime di dati.

4.5.1-Introduzione

Molte ricerche evidenziano la necessità di identificare nuove metodologie che ottimizzino lo sviluppo ZEB durante il processo di progettazione, per raggiungere obiettivi mai raggiunti prima, tra cui le applicazioni nella catalogazione di edifici storici, la creazione di modelli territoriali innovativi e integrati [13] o il miglioramento delle prestazioni energetiche del patrimonio culturale [117-119]. In questo contesto, la tecnologia BIM (Building Information Modeling) ha ampia applicazione grazie all'uso di un modello integrato, che include tutte le informazioni sull'edificio in un unico database. A differenza dei metodi di progettazione tradizionali, questo nuovo flusso di lavoro consente di utilizzare un database centrale per lo scambio e l'integrazione dei dati, basato sul formato aperto Industry Foundation Class (IFC) [120,122]. La sostenibilità dell'edificio è un problema di progettazione fondamentale, poiché le decisioni prese nella concezione del progetto influenzano in modo significativo l'impatto ambientale e la futura efficienza energetica dell'edificio [120,121,84]. L'obiettivo principale è illustrare l'idoneità dello strumento Building Performance Simulation (BPS) nelle prime fasi di progettazione e presentarne i vantaggi. Inoltre, questo è molto spesso un compito complesso a causa di un gran numero di parametri coinvolti nelle prestazioni degli edifici energetici, con la possibilità di condividere informazioni su architettura, materiali, sostenibilità, struttura e contesto [62,123]. In questo studio, il modello informativo dell'edificio è stato esportato in un formato di file IFC e quindi importato in uno

strumento di analisi energetica IDA-ICE, che supporta l'importazione da file IFC. Nella ricerca, è stato inoltre studiato un flusso di lavoro basato sull'utilizzo di un componente aggiuntivo di programmazione visiva a supporto, che grazie all'utilizzo di script permette la generazione di modelli semplificati per l'analisi energetica in IDA-ICE [116]. Nelle sezioni seguenti viene illustrata l'implementazione del flusso di lavoro, seguita da una discussione sui processi di estrazione delle informazioni e trasformazione del modello. Viene inoltre descritto come le informazioni sono mappate tra i modelli di dati dei file di input e output, rispettivamente, file IFC e IDM proveniente da IDA-ICE. Infine, considerando le sfide e i limiti associati a questo processo di progettazione, è stato discusso lo scambio di informazioni dal BIM ai modelli di analisi energetica.

4.5.2-Metodologia

A causa del notevole impatto del consumo di energia degli edifici, è importante che i progettisti individuino dove migliorare la fase di progettazione ottimizzando le prestazioni energetiche [91]. La ricerca attuale mostra che gli accordi sulle prestazioni dell'edificio con l'aiuto del BPS possono migliorare il processo di progettazione nZEB, durante le prime fasi di progettazione. Nel dettaglio, il documento mostra come un modello di edificio integrato può esportare tutte le informazioni richieste per un simulatore di prestazioni come IDA-ICE. Il flusso di lavoro metodologico è mostrato nella figura 29.

- Nella prima fase è stato creato il modello architettonico Autodesk Revit, comprensivo di tutte le caratteristiche geometriche, spaziali e termiche. Il caso di studio dell' ASHRAE è stato considerato come sistema di riferimento per testare l'ottimizzazione del processo reale, mentre viene utilizzato uno strumento di programmazione visiva per eseguire il modello 3D e preparare il file IFC per lo strumento di simulazione energetica;
- il secondo passaggio include il controllo IFC, l'esportazione e l'importazione IDA-ICE per l'esecuzione della simulazione energetica.

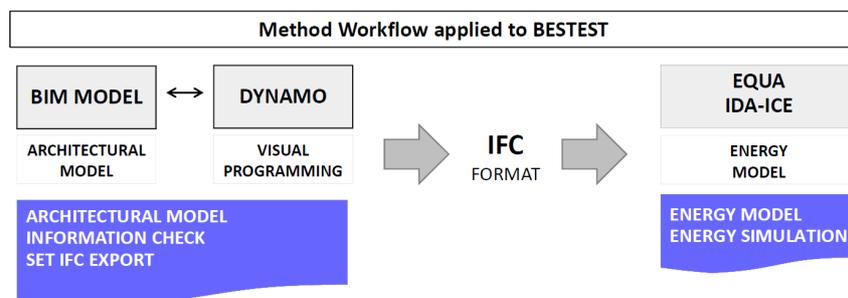


Figura 29: Workflow applicato ai BESTEST Caso 1

Quindi, da un lato è stato scelto Autodesk Revit come software BIM, dall'altro è stato scelto IDA-ICE, sviluppato da EQUA Simulation AB (Equa Simulation), come software energetico in grado di importare i modelli IFC. IDA-ICE (IDA Indoor Climate and Energy) è un'applicazione di simulazione multi-zona per la costruzione del carico termico che permette di simulare i consumi e le prestazioni energetiche degli edifici. È uno strumento indipendente con un'interfaccia grafica e un motore di simulazione, e il comando di importazione BIM consente di utilizzare direttamente il modello di edificio 3D proveniente dal formato IFC. Infine, è stato utilizzato Autodesk Dynamo per eseguire file di esportazione BIM e convertirlo correttamente nel file di input per la simulazione energetica. Dynamo è una piattaforma di scripting visivo open-source per la progettazione computazionale ed è un supporto integrato all'interno dello strumento BIM-Revit. Il file IFC è selezionato come formato di file del modello di informazioni sulla costruzione di input perché è lo schema di dati accettato per il BIM ed è lo standard ISO 16739-1: 2018. Esistono diverse sfide associate alla trasformazione dei modelli IFC. Queste sfide sono principalmente legate a:

- 1) modelli fisici con differenze di rappresentazione dei modelli analitici;
- 2) modifiche in corso negli standard IFC
- 3) problemi associati alla loro implementazione nello strumento di simulazione energetica.

Lo scambio aperto di informazioni BIM regolate dalla norma UNI è il formato IFC; pertanto, l'implementazione di questo formato specifico è la priorità degli strumenti di authoring BIM. Ciò ha un impatto significativo sull'implementazione di nuovi flussi di lavoro.

Il caso di studio

Nel presente studio, vengono utilizzati i BESTEST per valutare l'accuratezza del flusso di lavoro presentato dalla convalida del test per il clima e l'energia interni, rispetto allo standard ANSI / ASHRAE 140-2004. Il motivo principale per l'esecuzione dei test è accertare che i modelli computazionali forniscano valori ragionevoli rispetto ad altri programmi software e dallo strumento di importazione BIM. I casi selezionati sono mostrati in Figura 30.

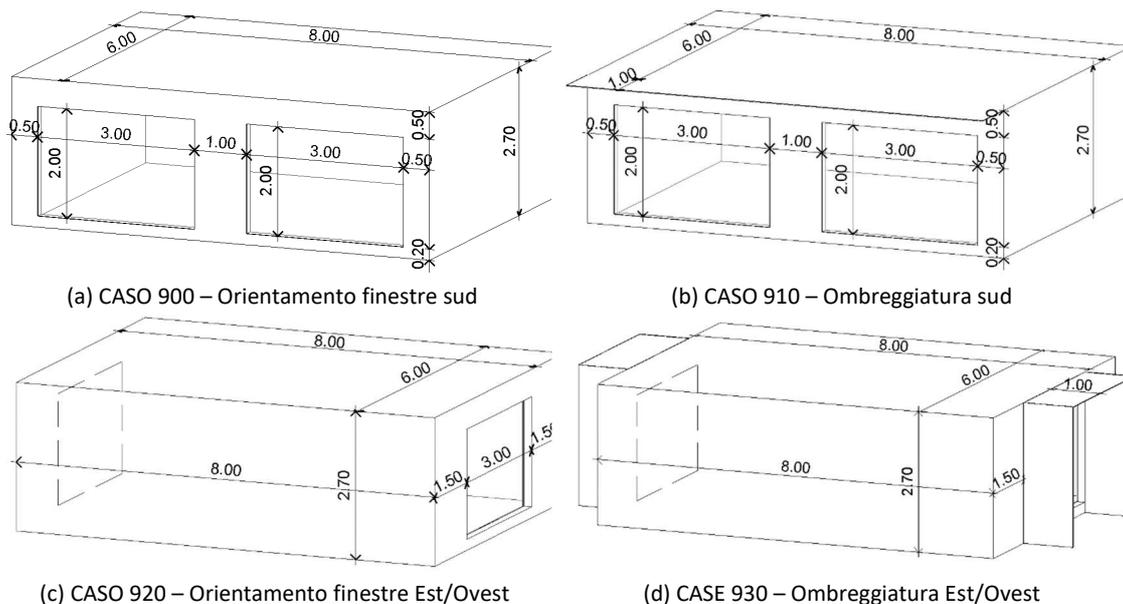


Figura 30: BESTEST 900-910-920-930

I quattro test sono costituiti da una singola zona rettangolare (8 m di larghezza x 6 m di lunghezza x 2,7 m di altezza) senza partizioni interne e con due finestre (3 m di lunghezza x 2 m di altezza) sull'esposizione sud o est-ovest. L'edificio sono caratterizzati da strutture verticali opache e di pavimento con massa particolarmente consistente (High Mass) (tabella 8). I quattro esempi mostrano piccole differenze in termini di esposizione e ombreggiatura, mentre le specifiche termiche sono definite e assegnate alla zona termica di riferimento.

Tabella 8 - Proprietà termiche degli elementi costruttivi

Pareti verticali	Pavimento	Copertura
Blocco di cemento	Blocco di cemento	Intonaco
Isolamento in schiuma	Isolante	Fibra di vetro
Rivestimento in legno		Tetto
U = 0.512 (W/m2-K)	U = 0.039 (W/m2-K)	U = 0.318 (W/m2-K)

L'uso di Dynamo porta a personalizzare il flusso di lavoro relativo alle informazioni, rendendo possibile automatizzare i processi di costruzione ed esportazione. L'applicazione di programmazione può essere utilizzata in modo indipendente, ma è anche in grado di interfacciarsi con Autodesk Revit, essendo un modulo aggiuntivo open source. Il suo utilizzo si sta diffondendo rapidamente, diventando indispensabile per la modellazione parametrica BIM. La programmazione visiva consente di sostituire la codifica elaborata convenzionale, con i blocchi di script visivi preimpostati, in grado di semplificare il flusso di automatizzazione. Per l'algoritmo ultimato sono stati effettuati

diversi test che hanno portato alla costruzione di quest'ultimo al fine velocizzare le operazioni di lettura e scrittura dei dati. Sono stati inseriti dei nodi precauzionali alla sola funzione di evitare malfunzionamenti dell'algoritmo ed è stata prevista l'impostazione di Dynamo Player che consente all'utente di utilizzare l'algoritmo direttamente dal software BIM evitando i passaggi previsti per l'import/export in Dynamo. Durante queste prove l'algoritmo ha svolto le funzioni richieste con esito positivo ed è stato generato il nuovo file IFC. L'operazione è stata conclusa in circa dieci secondi per ciascun test. Una volta caricato il file finale nel software BEM non sono state riscontrate irregolarità e le informazioni inserite sono state correttamente visualizzate in IDA-ICE. Un esempio del flusso di lavoro in Dynamo è mostrato nella figura 31.

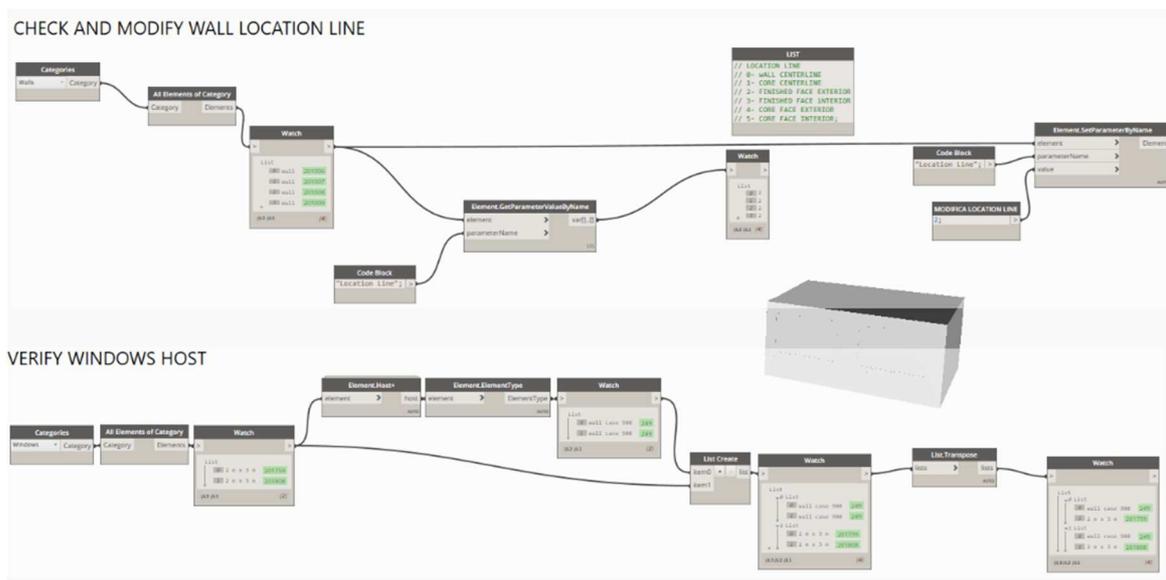


Figura 31: Workflow di utilizzo di Autodesk Dynamo

Grazie all'utilizzo dei codici di calcolo, è possibile gestire una grande quantità di dati, meglio conosciuti come "BIGDATA", creando un vero e proprio sistema di identificazione, controllo e archiviazione. In questo caso studio, la quantità di dati trattata non è stata notevole, ma lo studio del middleware ha comunque permesso di verificare la completezza dei dati necessari alla creazione del modello energetico prima della sua importazione in IDA-ICE. A seguire, all'interno del software di simulazione è stato importato il file IFC verificato, e la geometria viene visualizzata correttamente, mentre le caratteristiche termiche degli elementi costruttivi devono essere impostate. Il caso studio prevede che il coefficiente di trasferimento del calore sia dato come valore costante. IDA-ICE calcola la variabilità dei coefficienti di trasferimento del calore, a seconda della velocità e direzione del vento, della radiazione solare e delle condizioni meteorologiche esterne. La velocità di ventilazione dovuta all'infiltrazione è di circa 0,5 Vol / ora, mentre il carico interno è continuo di 200 W, 60% radiativo, 40% convettivo e 100% sensibile. Il sistema meccanico è un sistema di aria convettiva al 100%, senza perdite di condotti, riscaldamento <math>< 20^{\circ}\text{C}</math>, raffreddamento >math>> 27^{\circ}\text{C}</math> e temperatura del

suolo di 10 ° C continui. Le proprietà termiche del materiale e i tipi di elementi di costruzione vengono inizialmente impostati nello strumento Revit BIM e revisionati all'interno di IDA-ICE. Il processo di trasmissione è stato analizzato nel dettaglio sulla considerazione di 8 aspetti:

1. Orientamento e informazioni sul sito
2. Geometria nel suo insieme
3. Elementi di costruzione
4. Strati di elementi costruttivi
5. Proprietà termiche dei materiali di strato
6. Superfici di vetro
7. Ombreggiatura
8. Zone termiche

La valutazione del processo di trasmissione è avvenuta direttamente nel software energetico, attraverso l'identificazione della lettura manuale e automatica dei dati.

4.5.3-Risultati

I risultati di questa ricerca si concentrano sui problemi riscontrati nello scambio di informazioni derivanti dall'uso di Revit-Dynamo e IDA-ICE. Essendo il trasferimento di informazioni parte essenziale nel processo energetico dell'edificio BIM-BEM, confermare o confutare il successo della trasmissione è una priorità essenziale. Sono state valutate nel dettaglio le otto caratteristiche per ottenere la corretta prestazione energetica dell'edificio. Tali fattori sono stati implementati e verificati nel BIM e successivamente valutati nel BEM. La risposta di IDA-ICE al processo di trasmissione è quasi affidabile, sebbene alcuni elementi richiedano una mappatura manuale per funzionare correttamente. La mappatura avviene tra gli elementi importati e gli elementi creati nel software energetico, come accade per gli elementi di costruzione i quali devono subire un'associazione all'interno del software di simulazione. Questi elementi vengono letti correttamente come superfici ma richiedono un collegamento ad una categoria termica propria degli elementi di IDA-ICE per la simulazione energetica. La tabella 9 riassume i risultati.

Tabella 9 - Risultato del processo di trasmissione energetico

Informazione dati energetici	Creazione in Revit	Lettura in IDA-ICE	Creazione in IDA-ICE
Orientamento e informazioni sito	x	x/-	x
Geometria	x	x	-
Elementi costruttivi	x	x	Necessita di mappatura
Livelli degli elementi costruttivi	x	x	Necessita di mappatura
Proprietà termiche	Esportato ma non nella giusta classe IFC	-	x

Finestre	x	x	Necessita di mappatura
Ombreggiatura	-	-	x
Zone termiche	x	x	Necessita di mappatura

Dove “x” rappresenta la validità e “-“ la non validità.

Per prima cosa le informazioni di orientamento e il sito sono state entrambe implementati in BIM. IDA-ICE riesce a leggere la rotazione del nord reale del modello ma non la sua posizione geografica nel mondo. Ciò significa che i dati globali di posizione, clima e profilo del vento devono essere impostati una volta all'interno di IDA-ICE. Il secondo aspetto riguarda la geometria nel suo insieme, che viene perfettamente letta dallo strumento di simulazione. Tutte le superfici dell'edificio sono riconosciute nelle loro dimensioni spaziali. Il passaggio di lettura e importazione della geometria non viene completato fino a quando anche tutti gli elementi di costruzione e i livelli di costruzione non vengono associati correttamente, e mappati alle risorse interne di IDA-ICE. Per fare ciò, occorre prima che avvenga la creazione dei materiali o il caricamento dal database e di conseguenza l'associazione ai dati IFC. Ciascun elemento importato, deve essere di conseguenza associato ad una stratigrafia propria di IDA-ICE. Questo succede perché Revit esporta le caratteristiche termiche degli elementi costruttivi sotto forma di classe `IfcPropertySingleValue` e non in `IfcWall`, il che significa che i materiali non vengono esportati nelle classi IFC giuste e di conseguenza non vengono letti in IDA-ICE. Ovvero, ciascun elemento di Revit è dotato di una propria categoria (Wall, Window, Slab) mentre l'informazione è esportata come valore (Value). IDA-ICE da sola non è in grado di leggere il property value come associazione all'oggetto che rappresenta, pertanto occorre connettere manualmente i dati alla geometria. La figura 32 è un estratto IFC che mostra dove e come vengono esportate le caratteristiche termiche dei materiali BIM (es. thermal mass, thermal resistance, heat transfer coefficient, etc). Questo punto può diventare un limite per il processo di trasmissione perché potrebbe generare errori durante il processo di mappatura manuale. Una volta che tutti i materiali sono mappati manualmente all'interno di IDA-ICE, è possibile collegare la categoria IFC di costruzione alle risorse ICE di costruzione.

```
#493= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Family',$,IFCLABEL('Basic Wall: Wall Construction - Case 900'),$);
#494= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Family and Type',$,IFCLABEL('Basic Wall: Wall Construction - Case 900'),$);
#495= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Type',$,IFCLABEL('Basic Wall: Wall Construction - Case 900'),$);
#496= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Type Id',$,IFCLABEL('Basic Wall: Wall Construction - Case 900'),$);
#497= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Absorptance',$,IFCREAL(0.7),$);
#498= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Heat Transfer Coefficient (U)',$,IFCREAL(0.556215553002123),$);
#499= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Roughness',$,IFCINTEGER(3),$);
#500= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Thermal mass',$,IFCREAL(144293.),$);
#501= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Thermal Resistance (R)',$,IFCREAL(1.79786414565826),$);
#502= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Structural Material',$,IFCLABEL('Isolamento'),$);
#503= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Coarse Scale Fill Color',$,IFCINTEGER(0),$);
#504= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Function',$,IFCIDENTIFIER('Exterior'),$);
#505= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Width',$,IFCLENGTHMEASURE(0.1705),$);
#506= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Wrapping at Ends',$,IFCIDENTIFIER('None'),$);
#507= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Wrapping at Inserts',$,IFCIDENTIFIER('Do not wrap'),$);
#508= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Assembly Code',$,IFCTEXT(''),$);
#509= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Assembly Description',$,IFCTEXT(''),$);
```

Figura 32: Estratto del file IFC

La stessa procedura deve essere svolta per tutti gli elementi costruttivi, comprese le proprietà analitiche delle finestre o del tipo di vetro. Anche in questo caso, mentre le informazioni sulle dimensioni e la geometria delle finestre sono lette correttamente poiché esportate nella classe `IfcWindow`, i valori termici vengono esportati nella classe `IfcPropertySingleValue`, e quindi non possono essere letti automaticamente nello strumento IDA-ICE. Il risultato anche in questo caso è quello di dover mappare il tipo di finestra IFC sulle proprietà termiche create all'interno di IDA-ICE. Passando al problema dell'ombreggiatura, presente nel caso studio 930, è stato riscontrato che in Autodesk Revit non è presente nessuna categoria associabile all'ombreggiatura, per questo motivo sono state considerate diverse soluzioni. In primo luogo, è stato previsto l'uso di una parete sottile come elemento oscurante. Nella struttura dello schema IFC, ogni categoria di elementi ha un nome di classe IFC, come mostrato in precedenza per `IfcWall`, `IfcWindow` e `IfcPropertySingleValue`. Pertanto, la creazione dell'ombreggiatura mediante lo strumento muro significa avere un ulteriore muro analizzato nel modello energetico, che potrebbe creare errori di simulazione. Un secondo metodo di indagine è stato l'utilizzo del "modello generico" (come categoria di oggetto Revit), che presenta in questo caso risultati diversi. IDA-ICE riconosce la geometria dell'elemento inserito ma non la riconosce come categoria di ombreggiatura. Poiché anche in questo caso la classe IFC non viene accettata automaticamente in IDA-ICE, la soluzione richiede agli utenti di crearla manualmente rendendo vano il processo di importazione. L'ultima analisi è associata alle zone termiche. Anche in questo caso IDA-ICE può leggere i nomi e la geometria delle zone termiche, ma non il valore e le proprietà associate. Per tutti i punti analizzati, il processo di mappatura è un'operazione estremamente semplice e, nonostante la necessità di impiegare passaggi aggiuntivi per ottenere un risultato di simulazione, riveste ancora la capacità di risparmio tempo rispetto alla necessità legata al metodo tradizionale di dover creare da zero un nuovo modello energetico. I risultati in termini di energia non differiscono molto, quindi il risultato può essere considerato raggiunto in termini numerici e migliorabile in termini prestazionali. La tabella 10 mostra in dettaglio gli elementi analizzati durante il processo di trasmissione e la risposta di ogni caso di studio. I quattro edifici analizzati rispondono in modo molto simile poiché la geometria studiata non differisce molto tra un caso studio e l'altro. Un interessante lavoro futuro sarebbe quello di studiare casi complessi al fine di leggere la risposta di geometrie più grandi.

Tabella 10 - La risposta dei vari casi studio

	Orientamento	Località sito	Dati Climatici	Geometria muro	Geometria finestre	Esposizione Sud	Esposizione Est-Ovest	Geometria	Geometria	Elemento obreggiante	Proprietà ombreggiante	Proprietà termiche	Nome materiale	Tipo costruttivo	Nome spazio	Proprietà Spazi	Carichi termici
CASO 900		x	x				x			x	x	x				x	x
CASO 910		x	x			x					x	x				x	x
CASO 920		x	x				x			x	x	x				x	x
CASO 930		x	x			x					x	x				x	x

Dove il riquadro pieno rappresenta la corretta importazione, e la x la non riuscita del processo di trasmissione.

4.5.4-Conclusioni

Due aspetti sono emersi come priorità per ingegneri e architetti nello sviluppo di edifici a energia zero: la valutazione dettagliata delle analisi energetiche e la riduzione dei tempi e dei costi di costruzione. In questo quadro, il BIM potrebbe essere un potenziale strumento per ridurre costi e tempi durante la fase di progettazione dell'edificio, fornendo un file integrato unico che contiene informazioni architettoniche ed energetiche. A causa delle ben note difficoltà nell'interoperabilità BIM-BEM, l'obiettivo di questo lavoro è stato quello di sviluppare e verificare una nuova metodologia per superare il divario tra BIM e modelli energetici e facilitare l'uso del BIM nel processo di costruzione ZEB. Nel tentativo di progettare edifici performanti con l'ausilio di strumenti di progettazione, Scripting e simulazioni delle prestazioni degli edifici, sono stati condotti numerosi studi. Tuttavia, i modelli dinamici integrati mancano di procedure di interoperabilità comuni o codici standardizzati. Per questi motivi, la combinazione di uno strumento di progettazione BIM e uno strumento BPS crea ancora problemi di interoperabilità su cui la comunità di ricerca sta indagando.

In questo studio, il flusso di informazioni dal BIM al BEM non è completamente automatico a causa del processo di mappatura manuale. L'uso di script visivi Autodesk Dynamo ha facilitato la modellazione e la verifica delle informazioni 3D ma è stato utilizzato esclusivamente durante la prima parte del flusso di lavoro, in Revit. Per creare automaticamente il modello energetico e quindi avere un'interoperabilità automatica, tutte le informazioni IFC devono essere lette in IDA-ICE senza la creazione di nuovi parametri. Nel complesso, il risultato delle trasmissioni è considerato accettabile. Nel caso di un BIM automatizzato per BEM sarebbero necessari meno tempo e risorse e l'ottimizzazione diventerebbe parte di un processo di progettazione standardizzato. I prossimi steps potrebbero riguardare il trasferimento dei dati utilizzando altri software energetici associati al BIM o ulteriori investigazioni riguardo la trasmissione dei dati con IDA-ICE mediante l'utilizzo di un caso studio complesso, inserendo sistemi di impianti speciali, al fine di semplificare e facilitare il raggiungimento degli obiettivi ZEB.

4.6-Caso Studio 2: Testing the BIM-Ladybug tools interoperability: a daylighting simulation workflow

4.6.1-Introduzione

Al giorno d'oggi, sono in corso ampi studi di sviluppo per l'applicazione BIM nelle prestazioni energetiche e di illuminazione diurna. Il BIM consente di avere un database centrale, in cui i dati non sono frammentati, evitando i tradizionali limiti di analisi [120-122]. Per mezzo del file di scambio si possono leggere le proprietà dei materiali, dati sulla zona termica, dati limitati per il sistema HVAC e informazioni sul sito [129, 102]. Questa ricerca, presentata a BSA nel 2019, [117] analizza e sintetizza quali oggetti vengono trasferiti con successo dall'esportazione gbXML e quali subiscono una perdita di trasmissione sulla base di tre tipi di esportazione. A seguito di questo studio preliminare, i dati esportati con successo vengono implementati per le simulazioni annuali di luce diurna. Alcuni ricercatori hanno suggerito di utilizzare strumenti di middleware per migliorare il divario di esportazione dei file da BIM a BEM [127]. Secondo questo, Salakij et al. [133] ha sviluppato uno strumento di simulazione energetica tramite Matlab, in grado di leggere i file gbXML. Ladan et al. [131], spiegano una panoramica di quattro programmi specializzati in simulazioni di energia e illuminazione diurna mediante la trasmissione di file gbXML. In questo quadro, l'obiettivo della ricerca presentato è definire una metodologia che consenta il trasferimento di informazioni da un software di architettura (Autodesk Revit) agli strumenti Ladybug, un open source ambientale / energetico, nel formato dati gbXML. Nel dettaglio, questo studio si concentra sull'uso di Honeybee, fornito dagli strumenti Ladybug, che supporta gli utenti nella progettazione ambientale, fornendo simulazioni di luce diurna attraverso i motori RADIANCE. Questo strumento open source si collega agli script visivi Grasshopper/Rhino (middleware), consentendo di visualizzare graficamente le geometrie importate. Infine, è stato eseguito un calcolo delle diverse metriche annuali di illuminazione diurna. Gli autori sottolineano che lo scopo del documento è spiegare il flusso di lavoro, dettagliare i diversi set di esportazione del modello e riportare le limitazioni dello scambio di dati per la simulazione dell'illuminazione diurna. I risultati della simulazione energetica e ambientale saranno perseguiti nei lavori futuri.

4.6.2-Metodologia

Il ruolo della luce diurna è un campo ben noto, diventando una risorsa essenziale per il risparmio energetico e la salute delle persone [130, 128]. In base a ciò, è utile supportare un ambiente di illuminazione diurna correttamente progettato, consentendo agli utenti di ottenere risultati affidabili dal file di scambio gbXML. Entrambi gli strumenti software

analizzati sono stati progettati come tool parametrici, Revit Autodesk per la configurazione del modello e Grasshopper/Honeybee per la simulazione dell'illuminazione. Per testare e convalidare questa metodologia, è stato utilizzato un modello semplificato secondo il riferimento ASHRAE 140. Nel dettaglio, sono stati considerati quattro casi di base (900-930). La descrizione della metodologia, (figura 33), è riportata nelle seguenti sezioni.

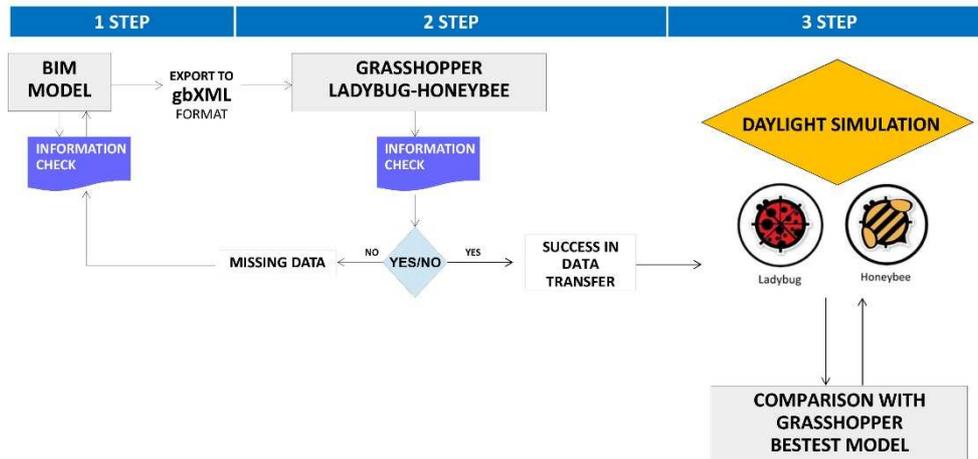


Figura 33: Workflow applicato ai BESTEST Caso 2

Descrizione del flusso di lavoro:

- Il primo passo è stato quello di creare il modello di test (BESTEST) nel software BIM Revit, comprensivo delle sue caratteristiche geometriche, spaziali e termiche. Questa parte svolge un ruolo fondamentale nei passaggi successivi poiché un criterio di modellazione errata si trasforma inevitabilmente in un trasferimento di informazioni errato. Una volta completato il modello 3D, vengono identificate le superfici analitiche e le zone termiche del modello energetico. Per esportare correttamente un file gbXML, il primo passo è scegliere tra impostazione energetica o volume locale/spazio; quindi impostare il tipo di edificio, la fase del progetto o la costruzione analitica. La funzione strutturale degli elementi principali (interna o esterna) deve essere impostata correttamente per tutti gli oggetti verticali e orizzontali. Honeybee ha bisogno di tali informazioni per eseguire la simulazione dell'illuminazione diurna. Infine, il tipo di costruzione e la destinazione d'uso è l'ultima informazione da verificare prima di esportare il modello 3D in Honeybee. Solo per la categoria di finestre, non è stato possibile automatizzare la procedura, richiedendo la necessità di crearle manualmente. Una volta impostato correttamente il modello, sono state studiate le possibilità di esportazione, ovvero: l'esportazione della stanza (room), l'esportazione dello spazio (space) e l'esportazione del modello energetico (energy model). I tre processi di esportazione sono stati studiati in tutte le loro caratteristiche e quindi confrontati per identificare la metodologia corretta.
- Nel secondo passaggio, il modello viene correttamente esportato e importato nell'ambiente di progettazione computazionale. Un nuovo componente

aggiunto nel 2019 consente allo strumento Honeybee di importare i file gbXML. Durante questo passaggio, tutte le informazioni provenienti dal file gbXML sono state verificate, e nel caso in cui alcune risultassero perse, la procedura è stata ripetuta dal primo passaggio. Grazie al trasferimento dei dati verificato, è possibile ottenere risultati preliminari affidabili e rapidi in linea con la fase di progettazione preliminare.

- Il terzo passo consiste nell'eseguire le simulazioni annuali di illuminazione diurna (DA e sDA) nello strumento Honeybee per ciascun caso analizzato. Infine, i risultati dei BESTEST importati vengono confrontati con quello modellati direttamente con Rhinoceros / Grasshopper per testarne la validità.

Descrizione dei tipi di set esportati in formato file gbxml

In questa sezione viene riportata una spiegazione di tutti i tipi di esportazione testati.

1. Il primo set di esportazione è il tipo Room, che implica la creazione della room (locali) all'interno di Revit. È l'esportazione gbXML più semplice perché vengono considerati pochi parametri come: la complessità dell'esportazione (Semplice / Complesso), gli Elementi dettagliati (sì / no), la fase del progetto (Esistente / Nuova costruzione) o l'involucro dell'edificio (Usa parametro funzione). In questo caso, le proprietà della zona termica non sono state considerate.
2. Successivamente, il tipo di set di esportazione di tipo Space, implica la creazione di spazi nel modello. Lo spazio Revit include tutte le informazioni termiche come proprietà della zona termica, carico termico, sistemi, occupazione e illuminazione. In questo caso, oltre ai precedenti sono stati considerati ulteriori parametri, come il servizio di costruzione (HVAC), i tipi di schema (se necessario) o la classe di infiltrazione dell'edificio.
3. Infine, l'esportazione del modello energetico è l'esportazione gbXML più completa che consiste in una generazione separata del modello energetico. In questo caso, sono stati impostati anche il tipo di edificio, il programma operativo, i sistemi HVAC e le informazioni sull'aria esterna. Solo questo tipo di esportazione richiede la creazione del modello energetico all'interno di Revit.

Successivamente, i tre tipi di esportazione sono stati confrontati una volta importati in Honeybee. I criteri di controllo sono stati dettati principalmente dal potenziale errore della simulazione di illuminazione diurna. Le informazioni sono state verificate identificando la perdita di trasmissione dei dati all'interno dello strumento Honeybee.

Impostazione della simulazione annuale della luce del giorno

Per ogni BESTEST vengono eseguite due simulazioni annuali di luce diurna, al fine di testare i file importati: la Daylight Autonomy (DA) e la Spatial Daylight Autonomy (sDA), utilizzando gli illuminamenti variabili nel tempo derivati dal file sul clima di Roma Ciampino, durante il tipico "anno lavorativo" (ovvero tra le ore 09:00-17:00). Secondo la definizione dell'Associazione svizzera degli elettricisti e il lavoro di Reinhart et al. [132],

il DA in un punto di un edificio è definito come la percentuale di ore occupate all'anno, quando il livello di illuminamento minimo può essere garantito dal solo fattore di luce diurna. La sDA, invece, misura la percentuale dell'area del pavimento che riceve un obiettivo di illuminamento stabilito per almeno il 50% delle ore annue occupate. Per questo studio, gli autori hanno impostato un livello di illuminamento di 300 lx (utile per le normali attività). Viene utilizzata Una griglia di 165 punti come piano di lavoro, con un'altezza di 0,8 m. La distanza tra punti consecutivi è 0,5 m, in tutte le direzioni, al fine di fornire risultati accurati.

Descrizione del caso di studio

Gli edifici scelti per testare i problemi di interoperabilità sono i casi 900-930 dello standard ANSI / ASHRAE 140-2004, come mostrato in figura 34. Per l'analisi di simulazione, i quattro casi studio si trovano a Roma. I modelli hanno una singola zona termica senza partizione interna 8 m x 6 m, e due finestre rivolte a sud 2 m x 3 m per i casi 900-910 ed est / ovest per i casi 920-930. Il caso di studio 910 differisce da 900 per la presenza di una sporgenza orizzontale di 1 metro sulla parete sud a livello del tetto, mentre il caso 930 include sporgenze di ombra e pinne di ombra attorno alle finestre est e ovest. Le caratteristiche termiche e fisiche degli elementi costruttivi sono riassunte nella tabella 14 e 15. Una volta nello strumento Honeybee, è stato considerato il file climatico Epw di Roma Ciampino con una latitudine di 41 ° 48,0384 ' N e una longitudine di 12 ° 36,0948 ' E.

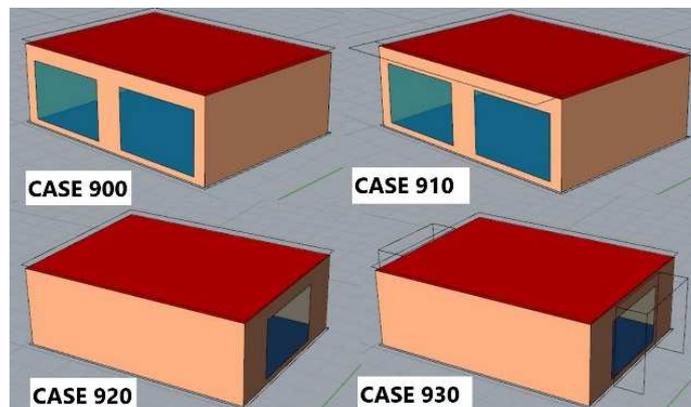


Figura 34: BESTEST Case 900-910-920-930

Tabella 14 – Proprietà degli elementi costruttivi

Pareti verticali U=0.512 (W/m2-K)	Blocco cemento 0.1 m
	Isolante schiumoso 0.0615 m
	Rivestimento in legno 0.009 m

Solaio pavimento	Cemento 0.08 m
U=0.039 (W/m2-K)	Isolamento 1.007 m
Copertura	Intonaco 0.010 m
U= 0.318 (W/m2-K)	Fibra di vetro 0.1118 m
	Tetto 0.019 m

Tabella 15 – Proprietà degli elementi vetrati

Doppio vetro	Spessore vetro 0.003 m
U=0.94 (W/m2-K)	Spessore strato aria 0.013 m

4.6.3-Risultati

Risultati di esportazione

In questa sezione sono stati illustrati i tre risultati dell'esportazione. La tabella 16 mostra un rapporto di riepilogo che elenca i tipi di esportazione a sinistra e le caratteristiche esaminate in alto. Il primo, l'esportazione della room, funziona correttamente e non sono stati rilevati errori dopo il processo di trasmissione. Le proprietà della geometria e del materiale sono state importate correttamente, mentre il nome dello spazio, il carico termico e le proprietà termiche dello spazio sono stati ignorati a causa dell'insieme esaminato. Inoltre, per l'esportazione spaziale non sono stati rilevati errori dopo il processo di trasmissione: le proprietà della geometria e del materiale, anche il carico termico e le proprietà termiche spaziali sono state correttamente importate.

Tabella 16 – Report di comparazione sulle esportazioni

Export type	Case	Orientation	Site Location	Weather Data	Wall Geometry	Window Geometry	Floor Geometry	Roof Geometry	Shading	Shading Properties	Thermal properties	Material Name	Construction Type	Spaces Name	Spaces thermal properties	Thermal Loads
ROOM	900	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	-	-	-
	910	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	✓	-	-	-
	920	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	-	-	-
	930	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	✓	-	-	-
SPACE	900	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	910	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	920	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	930	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓

ENERGY	900	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	X	✓	✓	✓
	910	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	X	✓	✓	✓
	920	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	X	✓	✓	✓
	930	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	X	✓	✓	✓
Legend: ✓ Correct import - Not provided X Import error																

Infine, l'ultimo tipo di esportazione del modello di energia ha mostrato un errore durante il processo di trasmissione riportato come: " mancano 2 superfici di costruzioni, verrà utilizzata la costruzione predefinita". In questo caso, non è stata trovata alcuna giustificazione dell'errore, ma è stato possibile indagare l'integrazione dei dati mancanti una volta nello strumento di Honeeybee. In seguito alla sostituzione di due superfici mancanti, anche questo tipo di esportazione ha funzionato correttamente. Inoltre, un ulteriore differenza riguarda che le esportazioni di spazio e stanza funzionano integrando gli elementi della finestra nell'involucro dell'edificio, figura 35 (a), mentre il l'esportazione del modello energetico crea un unico involucro chiuso con finestre sovrapposte alle superfici delle pareti, figura 35 (b). Tuttavia, questa differenza è solo grafica poiché entrambe queste rappresentazioni danno gli stessi risultati in termini di simulazioni. Nel nostro caso, per eseguire la simulazione dell'illuminazione diurna, è stata presa in considerazione l'esportazione più semplice relativa alla room. La scelta si basa sulla necessità di dati ai fini della simulazione della luce diurna. In questo caso, i dati termici e di infiltrazione dell'edificio derivati dagli altri due tipi di esportazione non erano necessari.

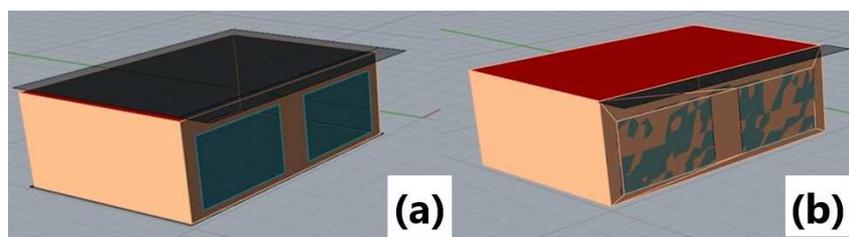


Figura 35: Esportazione Spazi (a), Esportazione modello energetico (b)

Risultati dell'illuminazione diurna annuale

BESTEST 900: importato e modellato

L'annuale Daylighting Autonomy (DA) e Spatial Daylighting Autonomy (sDA) sono stati calcolati per il BESTEST 900 (modellato e importato) con una soglia di 300 lx. La figura 36 mostra i risultati dell'autonomia diurna per ciascun punto all'interno della stanza.

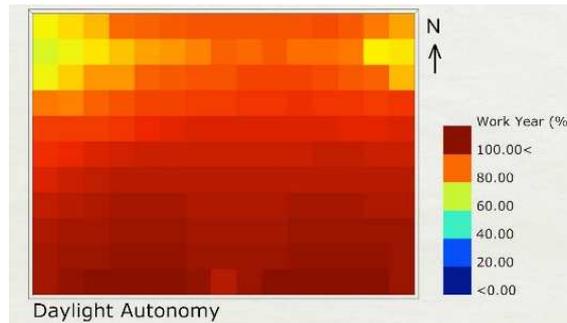


Figura 36: Caso 900 importato: DA (300 lx) risultati

Leggendo dalle mappe dei colori, DA è oltre l'85% dell'anno lavorativo in prossimità della facciata sud. I risultati inferiori invece si trovano più lontano dalla facciata vetrata. La totale quantità dei risultati è stata elaborata e sintetizzata dall'uso di indicatori statistici (tabella 17).

Tabella 17 – Caso 900: DA (300 lx) risultati

Statistical Indicators	Value (%)
Median	93
Maximum	100
Minimum	62
First Quartile	83
Third Quartile	97

Si può notare che il valore mediano è del 93%, quindi alcuni punti hanno registrato valori di DA elevati, in particolare quelli situati vicino alla finestra (ad una distanza di 1 m). La simulazione sDA ha fornito un valore del 100%, evidenziando il fatto che il livello di 300 lx è garantito per almeno il 50% delle ore annuali occupate. Di seguito, lo stesso caso 900 viene creato dallo strumento 3D Rhinoceros, per ottenere risultati affidabili utili per la validazione con il modello importato. La tabella 18 riporta i risultati del DA per il caso modellato 900 e si può notare che il valore minimo sta diminuendo dal 62% al 49%.

Tabella 18 – Caso 900 modellato: DA (300 lx) risultati

Statistical Indicators	Value (%)
Median	92
Maximum	100
Minimum	49
First Quartile	82
Third Quartile	97

Pertanto, esiste un punto (3 punti) che registra valori inferiori rispetto al caso importato. Il risultato mediano evidenzia questo fatto. Tuttavia, la tendenza globale dei risultati modellati è paragonabile al caso 900 importato. La simulazione sDA fornisce un valore del 99,39%, che è compatibile con il risultato 900 sDA.

BESTEST 910: importato e modellato

I risultati dell'illuminazione diurna (ad es. DA e sDA) per il caso 910 hanno raggiunto lo stesso valore rispetto al caso 900, pertanto, il confronto ha assunto un ruolo essenziale con il modello creato all'interno di Rhinoceros. La tabella 19 riassume i risultati DA per il modello BESTEST 910 modellato e si può notare una certa differenza rispetto al caso importato. In generale, i risultati sono abbastanza diversi rispetto alla tabella 17: in questo caso i valori stanno diminuendo, come è prevedibile, a causa della presenza di sporgenza (tabella 19)

Tabella 19 – Caso 910 modellato: DA (300 lx) risultati

Statistical Indicators	Value (%)
Median	91
Maximum	99
Minimum	42
First Quartile	81
Third Quartile	96

Di conseguenza, BESTEST 910 importato sembra non riconoscere la geometria dell'ombreggiatura, fornendo risultati di illuminazione diurna pari al caso senza sporgenza. Inoltre, la simulazione sDA ha ottenuto un valore del 97,58%, inferiore al caso gbXML importato.

BESTEST 920: importato e modellato

La figura 37 mostra la distribuzione DA per il BESTEST 920 con 300 lx.

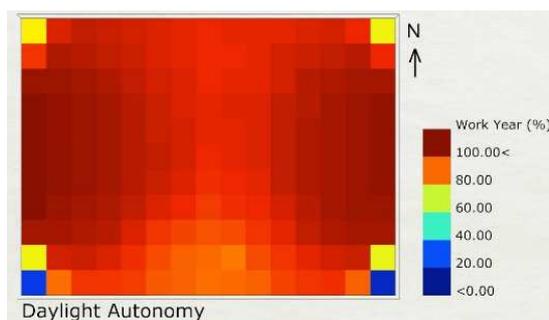


Figura 37: Caso 920 importato: DA (300 lx) risultati

Leggendo dalla figura 37, alti valori DA sono distribuiti vicino alle facciate dei vetri; al contrario, i risultati inferiori si trovano agli angoli della stanza. I risultati finali sono riportati anche nella tabella 20.

Tabella 20 – Caso 920 importato: DA (300 lx) risultati della simulazione

Statistical Indicators	Value (%)
Median	92
Maximum	100
Minimum	7
First Quartile	89
Third Quartile	97

Come mostrato nella tabella 20, il valore minimo è del 7% ed è possibile trovarlo in prossimità degli angoli della stanza. Alcuni punti hanno raggiunto i valori massimi del 100% e la mediana è del 92%. Per quanto riguarda la SDA, il valore misurato è del 98,79%. I risultati relativi al caso modellato sono riportati nella Tabella 21, che mostra alcune differenze rispetto alla tabella 20.

Tabella 21 – Case 920 modelled: DA (300 lx) results

Statistical Indicators	Value (%)
Median	91
Maximum	100
Minimum	6
First Quartile	88
Third Quartile	96

Come il BESTEST 900, il 920 è ben riconosciuto nella sua interezza dallo strumento di simulazione, fornendo risultati affidabili. Il valore mediano è inferiore a causa della diminuzione del valore minimo dal 7% al 6%. Tuttavia, tali differenze sono trascurabili. Il valore sDA è attestato al 97,68%.

BESTEST 930: importato e modellato

Infine, la tabella 22 riportava i risultati DA per il BESTEST 930 con i livelli di illuminamento di 300 lx. I risultati di questo caso non sono riportati come cifre, a causa della differenza di pochi valori che non può essere evidenziata attraverso le immagini qualitative.

Tabella 22 – Caso 930 importato: DA (300 lx) risultati

Statistical Indicators	Value (%)
Median	92
Maximum	100
Minimum	12
First Quartile	89
Third Quartile	97

Il valore minimo è del 12%, il massimo è attestato al 100% e la mediana è del 92%. Inoltre, la simulazione sDA ha raggiunto un valore del 98,79%. Di seguito, la tabella 23 riporta i risultati DA di questo caso modellati con lo strumento 3D.

Tabella 23 – Caso 930 modellato: DA (300 lx) risultati

Statistical Indicators	Value (%)
Median	88
Maximum	99
Minimum	0
First Quartile	82
Third Quartile	94

I risultati degli indicatori statistici hanno ottenuto risultati inferiori rispetto al caso 930 importato, in particolare la mediana e il minimo. La tendenza DA è generalmente ridotta a causa delle sporgenze sopra le finestre. Inoltre, il valore SDA del 92,73% sottolinea tali

differenze con il caso importato. Riassumendo, questi confronti sono stati utili per la convalida dei risultati, evidenziando che l'elemento shading non è stato importato correttamente attraverso il file gbXML.

4.6.4-Conclusione

Lo studio dell'interoperabilità tra BIM e modello energetico è ancora in corso, a causa dei diversi linguaggi tecnici tra i differenti software necessari alle simulazioni. In questo quadro, la ricerca propone un flusso di lavoro metodologico che può aiutare i progettisti a valutare il comfort dell'illuminazione diurna durante la prima fase di progettazione, grazie all'interoperabilità BIM e Building Energy Modeling (BEM). Per quanto riguarda i risultati, in generale, i tre tipi di esportazione funzionano correttamente all'interno degli strumenti energetici, grazie allo studio della corretta impostazione spiegata nella sezione metodologia. Il file di esportazione Room and Space non presenta errori durante il processo di importazione a fini di simulazioni di daylight. Il modello energetico importato non è influenzato dall'avvertimento mancante delle superfici, poiché è considerato solo un diverso tipo di rappresentazione 3D di massa geometrica. Alcune informazioni devono essere impostate all'interno dello strumento Honeybee, come il file climatico Epw e le proprietà della finestra, questi rappresentati i dati mancanti non correttamente importati dal file BIM. Successivamente, gli autori hanno convalidato i risultati dell'illuminazione diurna mediante il confronto con il BESTEST modellato direttamente nel software 3D. A causa di questo confronto, i casi 900 e 920 vengono importati e analizzati correttamente all'interno dello strumento luce del giorno. D'altra parte, BESTEST 910 e 930, i casi di ombreggiatura, non hanno fornito risultati affidabili e Honeybee non è in grado di riconoscere la geometria di sporgenza importata. Di conseguenza, lo scambio di informazioni sull'elemento di ombreggiatura richiede un'analisi approfondita per superare questo problema. In conclusione, questo lavoro rappresenta il primo passo nell'applicazione dell'interoperabilità BIM e BEM per l'analisi della luce del giorno. Gli sviluppi futuri esamineranno casi di studio più complessi per testare e verificare questa metodologia, implementando altre analisi di comfort ed energia.

4.7-Caso Studio 3: BIM-BEM support tools for early stages of zero-energy building design

4.7.1-Introduzione

La ricerca, presentata alla decima conferenza internazionale IAQVEC [135], mira a implementare e testare un nuovo flusso di lavoro che consenta di ottimizzare l'interoperabilità BIM-BEM per la valutazione del rendimento energetico degli edifici, applicato ad un caso studio semplice. Il formato del modello adottato per lo scambio di dati tra strumenti BIM e BEM è lo schema IFC, mentre è stato scelto il software IDA Indoor Climate and Energy (IDA-ICE) per l'analisi delle prestazioni energetiche e ambientali dell'edificio. Esso supporta il formato IFC e consente di ridurre la perdita di dati nella fase di importazione del modello. Infine, è stato utilizzato IDA-ICE Simplebim plug-in [125], per creare un file IFC semplificato per la generazione del modello energetico e, lo stesso tool ha permesso di il file IFC dei risultati ottenuti della simulazione energetica. Il fine ultimo è stato quello di ottenere un file BIM finale contenente tutte le informazioni geometriche, architettoniche ed energetiche.

4.7.2-Metodologia

Questo studio mira a implementare il processo di interoperabilità BIM-BEM, attraverso formato di dati utilizzato è l'IFC (Industry Information Classes), che trasferisce le informazioni importanti su tipo, proprietà e composizione dell'edificio. Inoltre, per questo caso studio vengono effettuate le simulazioni di riscaldamento, raffreddamento e acqua calda sanitaria, eseguite sulla singola abitazione unifamiliare situata a Roma. IDA-ICE, come strumento di simulazione, fornisce un importante componente aggiuntivo chiamato "Simplebim", in grado di controllare le informazioni IFC, durante il processo di esportazione ed importazione e consente di unire il modello IFC con informazioni aggiuntive. In particolare, può essere usato pre-post processo di simulazione, consentendo al contempo di ripulire il modello dai dati non utili prima della simulazione energetica (ad es. dati superflui per le analisi ma propri della progettazione architettonica: mobili, paesaggio e così via) e per unire post simulazione, i risultati dell'analisi energetica al modello IFC. Lo scopo è quello di ottenere un file unico contenente al suo interno tutte le informazioni architettoniche ed energetiche, riducendo la perdita di dati nel tempo. Infine, per analizzare l'output delle simulazioni energetiche, lo stesso caso studio presentato è stato creato direttamente all'interno del software IDA-ICE. Il confronto tra i risultati energetici forniti dall'importazione IFC e la modellazione diretta all'interno di IDA-ICE evidenzia la validità del processo. Il flusso di lavoro è riassunto di seguito e mostrato nella figura 38:

1. Il modello architettonico: il primo passo ha visto la creazione del modello architettonico nel software BIM Revit, dotandolo delle sue caratteristiche geometriche, spaziali e termiche. Una volta completato il modello 3D, tutta l'attenzione è stata dedicata al set di informazioni per l'esportazione IFC.
2. Importazione dell'IFC in IDA-ICE: il secondo passaggio include il controllo IFC e la pulizia con il componente aggiuntivo Simplebim e, di conseguenza, l'importazione del file nello strumento di simulazione energetica IDA-ICE.
3. La simulazione energetica: nella terza fase è stata eseguita la simulazione energetica del file importato e confrontata con un modello energetico creato direttamente in IDA-ICE.
4. Unione dei risultati energetici di IDA-ICE nel file IFC. Nell'ultimo passaggio, il componente aggiuntivo Simplebim IDA-ICE unisce i risultati della simulazione energetica al file IFC per ottenere un singolo file completo e dotato di tutte le informazioni necessarie.

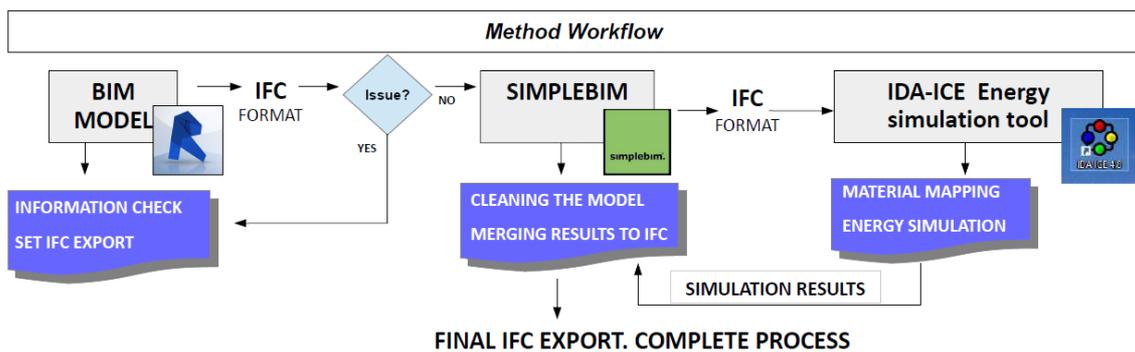


Figura 38: Workflow applicato al caso semplice Caso 3

Il caso di studio

Il caso di studio è una dimora singola di due piani vicino a Roma (lat. 41,94, lunga. 12,44). Il primo piano di 110 m² è composto da un ingresso, un bagno e un soggiorno, il secondo piano è di circa 60 m² ed è composto da due camere da letto e un bagno. Le informazioni sull'edificio e le caratteristiche dei materiali di costruzione sono riassunte rispettivamente nella tabella 11, 12 e 13.

Tabella 11 - Dati dell'edificio

Area pavimento	Volume	Area involucro	Finestre/Involucro	Valore U medio
----------------	--------	----------------	--------------------	----------------

169.3 m ²	625.6 m ³	449.9 m ²	9.2 %	0.6647 W/(m ² K)
----------------------	----------------------	----------------------	-------	-----------------------------

Tabella 12 - Caratteristiche dei materiali opachi costruttivi

Partizione	Spessore totale (m)	Materiali	Spessore (m)	Conduttività termica (W/mK)
Pareti esterne	0.30	Intonaco	0.015	0.9
		Mattoni pieni	0.12	0.72
		PUR (poliuretano)	0.03	0.022
		Mattoni pieni	0.12	0.72
		Intonaco	0.015	0.9
Pareti interne	0.18	Intonaco	0.015	0.9
		Mattoni pieni	0.15	0.72
		Intonaco	0.015	0.9
		Mattonelle ceramica	0.02	1
Pavimento intermedio	0.28	Massetto	0.025	0.47
		Cemento armato	0.22	2.3
		Intonaco	0.015	0.9
		Mattonelle ceramica	0.02	1
		Massetto	0.025	0.47
		Sabbia	0.02	0.33
Solaio a terra	0.40	EPS	0.09	0.036
		Cemento armato	0.25	2.3
		Pavimento flottante	0.02	0.18
		Massetto	0.025	0.47
		Sabbia	0.02	0.33
		Barriera a vapore	0.05	0.044
Copertura	0.40	EPS	0.09	0.036
		Cemento armato	0.25	2.3
		Intonaco	0.02	0.9

Tabella 13 - Caratteristiche dei materiali vetrati

Finestra	Dimensioni	Trasmittanza (W/m ² K)
3 pannelli vetro,aria, 4-12-4-12-4	1.5 m x 2 m	1.9
3 pannelli vetro,aria, 4-12-4-12-4	0.8 m x 2 m	1.9

Primo passo: il modello architettonico

Il primo passo della procedura ha richiesto la modellazione 3D dell'edificio attraverso Autodesk Revit. Questo è solo uno dei numerosi strumenti di modellazione delle informazioni sugli edifici disponibili sul mercato. Al fine di facilitare la creazione di dati energetici, è essenziale rispettare precise regole di modellazione al fine di semplificare il processo di trasmissione al software di simulazione. Le seguenti indicazioni sono state valutate e infine ritenute essenziali per impostare una modellazione corretta dell'edificio:

- Tutti gli oggetti devono essere vincolati al livello corretto in cui si trova la geometria (pareti, finestre, lastre, porte).
- Gli spazi / zone termiche sono obbligatori, senza di essi IDA-ICE non può accettare il file IFC. Il nome dello spazio è l'unica richiesta necessaria per

collegare le proprietà termiche e rendere possibile la simulazione energetica. Prima dell'esportazione, è necessario attivare il calcolo di area e volume.

- Un muro deve essere costituito con il suo profilo originale (non modificato) e contenuto in un solo piano dell'edificio, questo significa che può essere alto solo un livello. Una parete deve essere verticale, con spessore costante e definita con le proprietà termiche corrette, ciò facilita l'unione e la mappatura dell'elemento di costruzione in IDA-ICE. Anche gli strati di muro vengono considerati costanti su tutto il muro.
- Tutti gli oggetti del modello architettonico diversi dagli elementi di costruzione vengono ignorati.
- Le forme complesse (in particolare le facciate continue) devono essere semplificate prima dell'importazione in IDA-ICE. Ad esempio, le forme curve sono generalmente divise in poche pareti lineari.
- Anche la scelta del sistema di misurazione e delle unità di misura sono importanti. IDA-ICE utilizza il Sistema Internazionale, quindi, per evitare il processo di conversione, è bene utilizzare lo stesso.
- IDA-ICE considera l'elevazione del livello del suolo a zero del sistema di coordinate locali dell'edificio.
- L'impronta di un piano dell'edificio non deve contenere buchi (es. vano scale).
- Prima di esportare il file IFC, è necessario scegliere "Limiti di spazio 2° livello" ed "Esporta set di proprietà Revit" all'interno del set di esportazione.

Secondo passaggio: importazione dell'IFC in IDA-ICE

Una volta esportato il file IFC da Revit, il passo successivo è quello di importarlo nello strumento middleware di Simplebim. Questo passaggio è risultato importante per verificare gli elementi correttamente esportati e avviarne la semplificazione. Ciò ha permesso in primo luogo di trovare alcuni errori di modellazione nel modello BIM che sono stati identificati e corretti prima di ulteriori esportazioni. Una volta caricato il file IFC in IDA-ICE, si è proceduto alla mappatura di tutti gli elementi di costruzione importati con i materiali del software di simulazione energetica (come dettagliato nel caso studio precedente).

Terzo passo: la simulazione energetica

Le esigenze di riscaldamento e raffreddamento sono state simulate per ogni zona termica dell'edificio. Le temperature di setpoint sono state impostate per la stagione invernale e la stagione estiva, rispettivamente a 21 °C e 26 °C. Per la domanda preliminare di energia, i guadagni termici non vengono considerati mentre per la

domanda di acqua calda sanitaria, vengono rispettati input quali numero della persona e litro procapite, secondo la norma UNI / TS 11300 [11] per tutto l'anno. Questo passaggio ha visto anche la creazione di un modello energetico della palazzina, direttamente all'interno di IDA-ICE. Sono state lanciate le simulazioni energetiche e confrontate con i risultati ottenuti dal caso importato

Quarto passaggio: importazione dei risultati IDA-ICE all'interno del file IFC

L'ultimo passo della ricerca è stato quello di utilizzare la capacità di SimpleBIM per unire i risultati della simulazione IDA-ICE al modello originale ed esportarli in un nuovo file IFC. Questa è una caratteristica unica e interessante perché ci sono pochi strumenti disponibili sul mercato che consentono di combinare un file di informazioni IFC con i risultati della simulazione energetica.

4.7.3-Risultati e discussione

Le simulazioni sono state eseguite per l'intero anno (2017). La figura 39 mostra i risultati del fabbisogno energetico: è possibile notare che la domanda di riscaldamento (34 kWh / m²anno) è maggiore a gennaio e dicembre, la domanda di raffreddamento (40 kWh / m² anno) ha il suo picco a luglio. Per quanto riguarda l'acqua calda sanitaria (15 kWh / m² anno), aumenta leggermente durante la stagione invernale.

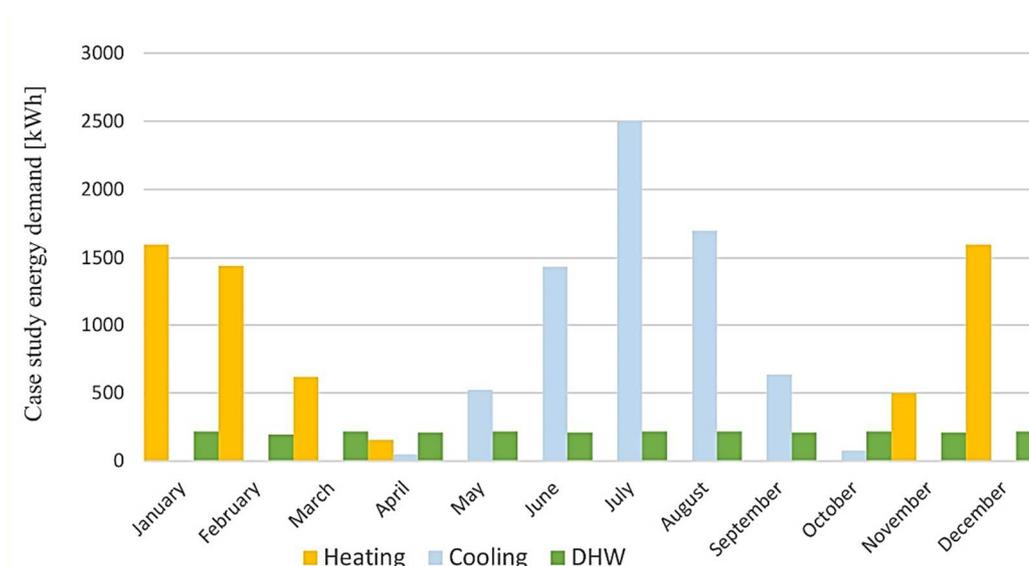


Figura 39: Risultati energetici dal file IFC

Al fine di convalidare tali risultati, il caso studio è stato modellato direttamente all'interno del software IDA-ICE, e confrontato con il caso studio importato dall'IFC. Sono

state quindi impostate le stesse condizioni di simulazione energetica. La differenza percentuale tra i risultati energetici forniti dal modello di importazione IFC e dal modello IDA-ICE è di circa il 5%, come mostrato nella figura 40.

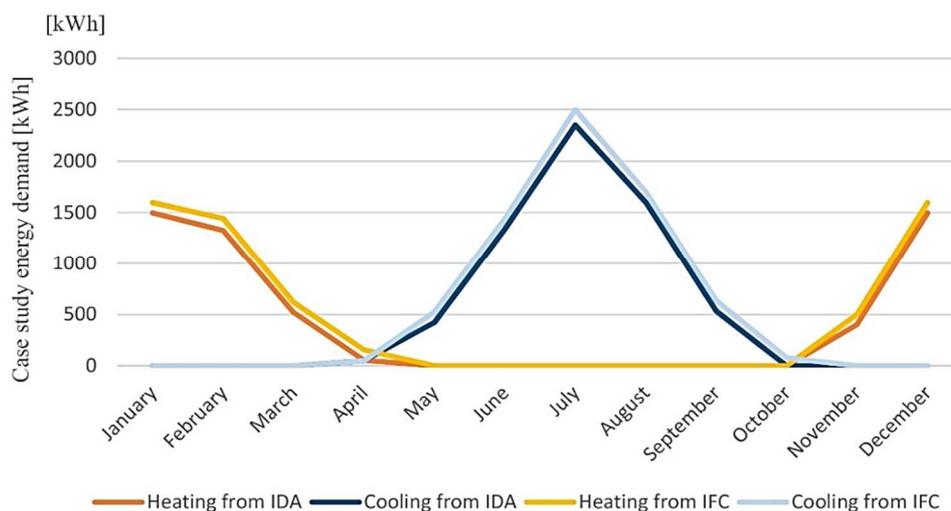


Figura 40: Comparazione tra le simulazioni energetiche provenienti dal file IFC e quelle create dal modello IDA-ICE

4.7.4-Conclusioni

A causa delle ben note difficoltà nell'interoperabilità BIM-BEM, l'obiettivo di questo lavoro è quello di verificare un processo per superare il divario tra BIM e i modelli energetici, facilitando l'uso del BIM nel processo di costruzione ZEB. I risultati confermano l'applicabilità dell'approccio metodologico proposto per un caso studio semplice. Il file IFC completo ottenuto nell'ultima fase di questo flusso di lavoro contiene sia i dati architettonici completi sia le informazioni sulla prestazione energetica dell'edificio, utili per la verifica e l'applicazione degli obiettivi ZEB. D'altra parte, l'uso di un file modello unico limita la possibilità di errore causato dallo sviluppo di diversi modelli di simulazione durante il processo di progettazione. Tuttavia, anche questa procedura ha riscontrato alcuni ostacoli procedurali nel corso della trasmissione dei dati, che hanno portato a ripercorrere alcuni passaggi ripetendo l'esportazione. In questo senso l'utilizzo di Simple BIM ha permesso di individuare con semplicità gli errori di lettura, evitando di trasferire le inesattezze all'interno del software di simulazione causando risultati falsati. Le ricerche future mirano a migliorare questa metodologia, riducendo gli errori di trasferimento dei dati e a studiare l'uso di altri software energetici associati al BIM, ma soprattutto investigando sistemi energetici complessi.

4.8-Considerazioni

Il fulcro della metodologia, ovvero il modello BIM, racchiude in sé l'intero processo e la totalità delle informazioni di un edificio. Modellare un edificio oggi non comprende solo la definizione delle forme geometriche, ma rappresenta la strutturazione delle informazioni in schematico e testuale. Inoltre, quanto modellato dovrà essere accessibile tra i vari professionisti in modo da integrare tutti i temi previsti dalle diverse fasi progettuali. Ogni disciplina diviene parte di un unico grande processo integrale che inizia con l'istituzione di un progetto e termina con la demolizione dell'edificio costruito. In tal senso la metodologia BIM ha fatto, e continua a fare tuttora, passi da gigante per il progredire della qualità degli strumenti interoperabili e la gestione delle informazioni. Il tempo porterà sicuramente ad un continuo sviluppo grazie al quale sarà implementata la capacità di interoperabilità fra le parti. In parallelo il formato IFC continuerà a rilasciare schemi sempre più dettagliati che si presteranno, in un futuro prossimo, alla gestione della totalità delle informazioni in modo dinamico, adattandosi perfettamente ad ogni realtà progettuale, probabilmente anche per gli aspetti energetici, oggi orientati al gbXML. Le ricerche affrontate fin ora hanno permesso di avvalorare gli studi sia in termini di trasferimento del dato che di simulazioni. Nel caso Test è emerso che il flusso di informazioni dal BIM al BEM non è completamente automatico a causa del processo di mappatura manuale che deve essere affrontato nel software di simulazione energetica. L'uso di middleware ha facilitato le fasi di modellazione e verifica delle informazioni 3D ma chiaramente il suo utilizzo si concentra esclusivamente durante la prima parte del flusso di lavoro. In termini simulativi, la differenza percentuale tra i risultati energetici forniti dal modello di importazione IFC e dal modello IDA-ICE è di circa il 5%, per cui può essere considerata accettabile. In conclusione per creare automaticamente il modello energetico e quindi avere un'interoperabilità automatica, tutte le informazioni IFC dovrebbero essere lette dal software di simulazione senza la creazione di nuovi parametri.

5: IL CONTRIBUTO DEL DIGITAL TWIN PER LA DIGITALIZZAZIONE DEL PATRIMONIO

Negli ultimi anni sono state sviluppate molte ricerche per consentire alle tecnologie BIM di lavorare in modo collaborativo ed organizzato, offrendo la possibilità di tracciare, mantenere e conoscere la controparte digitale del manufatto. Il futuro della creazione del BIM è quello di partecipare all'era connessa, che consente al Digital Twin di aggiornarsi quasi in tempo reale man mano che lo stato dell'oggetto fisico si trasforma. L'espressione Digital Twin, gemello digitale, è oggi tra quelle che più simboleggiano il progredire dell'IT nell'industria delle costruzioni [136]. La rappresentazione omologa digitale di elementi costruttivi, dalle materie prime alle grandi metropoli, permette di fondere aspetto e set di dati informativi affini, trovando un forte punto di incontro con il BIM. La transizione dall'oggetto fisico alla sua replica digitale ha in realtà precedenti molto lontani, e nasce nell'ambito dell'industria aerospaziale con lo scopo di rappresentare tridimensionalmente un manufatto fisico grazie alle tecniche di rilievo, integrando le geometrie con le informazioni misurate. L'impiego di sensori garantisce il costante aggiornamento dei dati del manufatto, rilevando in tempo reale lo stato di salute, le condizioni di esercizio, le eventuali anomalie e le potenziali situazioni di rischio. Nel campo edilizio è possibile, ad esempio, collegare al Digital Twin parametri di tipo energetico in modo da monitorare il consumo di energia, i relativi costi e le possibili misure volte alla loro ottimizzazione [137,140]. O ancora, tali possibilità di monitoraggio possono trovare applicazione nella gestione delle infrastrutture o, su scala ancora più ampia, di intere aree urbane (Digital City), aprendo scenari alle Smart Cities [138]. Le soluzioni di questo tipo hanno vastissimi campi di applicazione e permettono di contribuire alla pianificazione urbana, al catasto, alla gestione del rischio e delle emergenze, al monitoraggio ambientale, alle telecomunicazioni, al turismo, al mercato immobiliare, o ai sistemi per la partecipazione e la gestione degli utilities. Pertanto, la libera comunicazione delle informazioni territoriali al modello digitale ha lo scopo di fornire:

- 1) Visualizzazione dell'ambiente urbano o/e delle proposte progettuali
- 2) Analisi dell'impatto sociale e ambientale delle proposte.
- 3) Sviluppo digitale delle informazioni e conservazione nel tempo
- 4) Comunicazione Cloud per gli utenti
- 5) Raccolta del feedback degli utenti

Le città sono sistemi complessi collegati alle condizioni e ai cambiamenti economici, ecologici e demografici, caratterizzati da percezioni e interessi divergenti dei cittadini e delle parti interessate. Pertanto, nella pianificazione urbana, nasce il bisogno di approcci

che siano in grado di far fronte non solo alla complessità progettuale, ma che consentano anche processi partecipativi e collaborativi tra le parti. Diventa evidente che il modello 3D svolge un ruolo essenziale in questo ambito, in quanto deve rappresentare con estrema precisione caratteristiche fisiche e informative, per poter svolgere funzioni di integrazione con altre tecnologie che ne consentono la lettura reale dell'edificio. Da questa relazione segue inoltre la necessità di sviluppare l'approccio sin dalle fasi più precoci del processo edilizio, partendo dalla progettazione e costruzione, che rappresentano i momenti ideali per la raccolta di tutti i dati utili. In questo quadro, la conversione 3D del patrimonio immobiliare rende possibile la gestione e la visualizzazione Cloud di notevoli quantità di dati, mirando a rivoluzionare digitalmente il mondo delle costruzioni e la manutenzione degli edifici. Il processo si basa sulla codifica di inserimento e aggiornamento dei dati, che permettono di conservare nel tempo le informazioni sulla realizzazione dell'edificio, la sua trasformazione e la sua capacità di garantire non solo sicurezza e comfort, ma anche un utilizzo ottimale dell'opera [141]. La significativa espansione delle città sta portando le industrie di costruzione internazionali e gli enti di ricerca a sviluppare nuovi metodi per sostenere i progetti di gestione, grazie all'impegno di dati legati al dominio geospaziale e al facility management [139]. Diverse città nel mondo si stanno già operando per creare le Digital City, ovvero modelli di città 3D semantici in grado di raccogliere notevoli quantità di informazioni messe a servizio della comunità. In ambito nazionale le Digital City rivestono un campo ancora lontano, ma troviamo esempi legati al Digital Twin, con la creazione dei primi modelli di gemelli digitali per la Stazione Centrale di Milano e la Stazione Centrale di Napoli, prodotti grazie all'utilizzo di nuvole di punti, e sulla base di documentazione, rilievi e fotografie. A causa delle importanti quantità di dati geospaziali, le infrastrutture di archiviazione, analisi, gestione, interazione e visualizzazione dei modelli di città, sono molto complesse. Mentre da un lato le applicazioni e gli utenti traggono vantaggio dal modello informativo ricco di dati, dall'altro nascono elevate esigenze di inserimento e archiviazione, di gestione e di analisi, sia dal punto di vista delle infrastrutture tecnologiche, che dalla possibilità di trovare professionisti specializzati nel settore. La struttura spaziale 3D varia da entità molto semplici a entità molto complesse e nidificate, ogni oggetto può essere rappresentato spazialmente da più geometrie di diversi tipi nello spazio 3D (ad es. Poligoni, mesh, solidi) e in diversi livelli di dettaglio (LOD) [159]. Per rispondere a queste esigenze è stata sviluppata una piattaforma web basata su un GIS 3D (Geographic Information System), cogliendo l'opportunità di combinare dati numerici con entità georeferenziate, con il chiaro vantaggio di ottenere un grande impatto comunicativo, pur garantendo la sicurezza di enormi quantità di dati.

5.1-Background: The Smart(er) City

Le città sono sistemi complessi perché costantemente collegati a dinamiche economiche, ecologiche e demografiche in continua evoluzione nel tempo [142–144]. Al loro interno, le sfide dei sistemi complessi vengono affrontate applicando una gamma diversificata di concetti più o meno innovativi e tecnologici, come ad esempio il car-sharing e la guida autonoma, le reti energetiche intelligenti decentralizzate, i Smart Building, la digitalizzazione e la condivisione Cloud. Il concetto in sé risale all'inizio degli anni '90 ed è associato alla crescita intelligente; ma non esiste una definizione generalmente accettata che corrisponda al concetto di Smart City a livello globale [145]. La definizione è di larghe vedute e spazia dall'interrelazione tra l'educazione della popolazione, i servizi locali [146-148], fino alle teorie che descrivono città o progetti che utilizzano tecnologie dell'informazione e della comunicazione al fine di migliorare la qualità della vita dei propri abitanti nell'ambito dello sviluppo sostenibile [149,150]. In questo contesto, la pianificazione intelligente sostenibile si occupa dello sviluppo di strategie per ridurre e riciclare le risorse, aumentare l'efficienza economica e migliorare l'integrazione degli aspetti sociali. Si tratta, ad esempio, di ambienti pedonali, reti stradali e sistemi di mobilità efficienti, uso sostenibile del suolo, servizi, assistenza sanitaria, cultura e tempo libero. Alcuni autori stanno combinando l'approccio della città sostenibile e intelligente [151-152], e per altri, il concetto è considerato una risposta al cambiamento climatico globale o un passo per rendere la gestione della città più efficace [153]. Le implicazioni sociali ed etiche dello sviluppo di queste tecnologie digitali, così come la crescente influenza dei giganti della tecnologia sull'economia delle città, la libertà e la privacy dei suoi abitanti, sono questioni separate e non prese adeguatamente in considerazione all'interno di molte di queste definizioni e concetti. Le città intelligenti stanno aprendo la strada alla raccolta dei cosiddetti "big data", ovvero database o reti di sensori (Internet of Things, IoT) creati in modo da raccogliere informazioni per testare e creare sofisticate simulazioni sui processi urbani e anche sugli aspetti comportamentali dei propri cittadini. L'asset di investimento tecnologico e i modelli di business basati su tecnologie, algoritmi e dati, sono spesso nelle mani di grandi aziende ICT (tecnologie dell'informazione e della comunicazione), che creano dipendenze ai comuni, amministrazioni, e alla società. Questa dipendenza si applica in particolare alle città di piccole e medie dimensioni, dove gli organi amministrativi hanno spesso risorse limitate in termini di personale e di budget. La pressione dell'era della trasformazione digitale in continua crescita, con complessità e richieste più elevate per la gestione dei dati, nonché un crescente bisogno di trasparenza, fa sì che gli strumenti e i metodi di pianificazione convenzionali non riescano a far fronte alla complessità dei sistemi urbani. Il prototipo di un gemello digitale per la pianificazione urbana offre il potenziale per affrontare i sistemi complessi di città, simulando possibili risultati e impatti e tenendo conto delle

esigenze e dei requisiti eterogenei dei cittadini, consentendo inoltre una pianificazione partecipativa e collaborativa. Questo si basa su dati ad accesso aperto e software open source, restituendo ai cittadini la sovranità dei dati e l'accesso alle informazioni. L'insieme di questi fattori rappresenta la base per la costruzione di città più Smart.

5.2-Il punto di partenza del Digital City e la sua integrazione con il BIM

Per rendere le città più intelligenti e mantenerle nel tempo, le applicazioni delle Smart City necessitano di dati di massa, statici e dinamici, attuali e storici, geometrici e semantici, microscopici e macroscopici. La raccolta, la gestione e l'applicazione si semplifica quando la raccolta di questi dati proviene da tecnologie consolidate quale il Building Information Modeling (BIM) e Geographic Information System (GIS). L'introduzione della terza dimensione nel panorama geospaziale è accoppiata alla definizione di modello di città semantica 3D sviluppato insieme al CityGML, uno standard internazionale per la modellazione, l'archiviazione e lo scambio di dati spaziali relativi all'ambiente costruito. L'utilizzo di questo modello di dati si è diffuso nella parte settentrionale dell'Europa con un'ampia gamma di campi di applicazione. Il BIM può essere utilizzato per creare, gestire e condividere i dati del ciclo di vita di strutture verticali come gli edifici, mentre il GIS può essere utilizzato per archiviare, gestire e analizzare i dati che descrivono l'ambiente urbano, che è distribuito orizzontalmente. Pertanto, l'applicazione integrata di BIM e GIS è essenziale nelle applicazioni di digitalizzazione del costruito in cui sono richiesti i dati sia delle strutture che dell'ambiente urbano. A causa del fatto che il BIM, come è inteso oggi, è di recente popolarità, la sua applicazione integrata con il GIS lo è ancora meno, non avendo ancora una teoria valida sulla loro integrazione [157]. Mentre le informazioni GIS sono necessarie per la pianificazione e il funzionamento di strade, ponti, aeroporti, reti ferroviarie e infrastrutture situate in uno specifico contesto ambientale, le informazioni BIM sono fondamentali per la progettazione e la costruzione di tali strutture. Il GIS si fonde con il BIM in uno strato di contesto geo-spaziale essenziale alla completezza informativa. Ciò significa, ad esempio, che il GIS può fornire informazioni sulle aree soggette a inondazioni e fornire ai progettisti informazioni accurate per influenzarne la posizione, l'orientamento e persino i materiali da costruzione di una struttura. Le informazioni GIS operano su scala cittadina, regionale e nazionale, mentre i dati BIM si applicano alla progettazione e alla costruzione di un edificio o una struttura specifica [155]. Unendo i dati GIS e BIM, i manufatti possono essere inseriti nel loro reale contesto, in un panorama più ampio e intelligente creando un ambiente gestibile sia a livello territoriale che del fabbricato. Il risultato è quello di ottenere un edificio collocato in uno specifico lotto di terreno, con servizi pubblici e strade annesse. Quando si mettono insieme queste due scale relative e si spostano le informazioni senza

interruzioni o perdite tra di esse, si elimina la ridondanza dei dati e si ottimizza il flusso di coscienza. L'aggiunta di un contesto geo-spaziale permette al proprietario del progetto di ottenere risultati migliori e risparmio di denaro, e significa ottimizzare materiali e risorse, simulazioni accurate, efficienza e sostenibilità [154]. Inoltre, si aggiunge la possibilità che tutte le informazioni GIS e BIM possono essere archiviate nel cloud, fruibili e facilmente gestibili dagli operatori e dagli utenti. Le parti interessate sia nel campo dell'infrastruttura che nei progetti di costruzione degli edifici, sono in grado di gestire i dati in qualsiasi ambiente e in qualsiasi parte del mondo, con semplicità di accesso. Entrambi i sistemi (figura 41) rappresentano quindi delle proprietà comuni, pur venendo da campi differenti:

- Entrambi i sistemi informativi 3D gestiscono modelli 3D arricchiti semanticamente, con gerarchie e relazioni
- Le geometrie hanno più livelli di dettaglio (LOD)
- Obiettivo non è solo rappresentanza, ma anche gestione patrimoniale
- Il collegamento più "naturale" è l'edificio

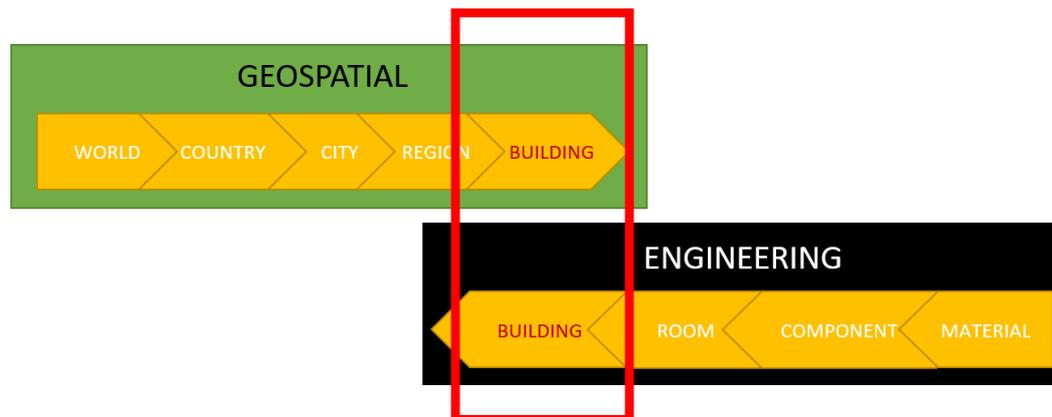


Figura 41: Il punto di incontro tra il BIM e il GIS (l'edificio)

Per fornire una migliore comprensione della situazione attuale e della futura direzione del settore emergente, è stata effettuata una ricerca bibliografica su lavori esistenti. Nell'ambito della pianificazione, l'integrazione di BIM e GIS è stata utilizzata per attività quali la selezione del sito, la progettazione energetica, la progettazione del traffico, la progettazione strutturale, la progettazione acustica degli interni, la valutazione climatica, l'autorizzazione alla progettazione e la valutazione delle prestazioni. A livello bibliografico è stato possibile riscontrare che Park e Kim [204] hanno dimostrato un approccio per costruire e presentare il modello 3D del sito del progetto da modelli BIM e mappe del sito, foto satellitari, mappe di registrazione del terreno e pianificazione del territorio, per consentire ai progettisti di effettuare una prima valutazione del volume

costruibile. Per quanto riguarda la progettazione energetica, De Hoogh et al. [205] hanno collegato le caratteristiche e gli indicatori relativi all'energia a diversi livelli di spazio (singoli spazi, area funzionale, edificio e distretto) basato sull'interoperabilità tra BIM e GIS per valutare e ottimizzare le prestazioni di efficienza energetica dei diversi livelli di spazio in fase di progettazione. Niu et al. [206] ha sviluppato un sistema di visualizzazione integrato basato sul web BIM-GIS dei dati energetici degli edifici in cui i progettisti potevano verificare la conformità della progettazione degli edifici con lo schema di sviluppo urbano. Altri esempi riguardano la progettazione del traffico di Wang et al. [207], la progettazione strutturale in una ricerca di Sergi e Li [208], la progettazione acustica degli interni di Deng et al. [209], e la valutazione climatica Hjelseth e Thiis [2010]. Nella gestione di mega progetti di rinnovamento urbano, Choi et al. [211] ha sviluppato un sistema di gestione delle informazioni basato sull'integrazione di BIM e GIS per consentire a diverse parti interessate di comprendere meglio i risultati delle decisioni in fase di pianificazione. Ronzino et al. [212] ha proposto un'architettura software con dati di costruzione dettagliati da BIM, informazioni georeferenziate da database GIS e dati in tempo reale da sensori per facilitare la simulazione e la gestione del consumo energetico a livello di distretto urbano. Sebbene negli ultimi anni molti studi hanno mostrato come integrare il BIM e GIS e, benché molti di questi sforzi abbiano avuto successo, non è stato trovato un processo universale che non necessiti di ulteriore implementazione.

5.3-II passaggio al digitale per la sostenibilità del patrimonio culturale italiano

Uno scenario molto comune delle pubbliche amministrazioni italiane e delle organizzazioni private, è la scarsa propensione alla digitalizzazione ed in particolare alla possibile geo-localizzazione del dato. Come riportato in precedenza il nuovo codice degli appalti scandisce gli obblighi di adeguamento tecnologico e infrastrutturale alla digitalizzazione nella sezione dei lavori pubblici. In particolare, dal 1° gennaio 2021, ai lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara pari o superiore a 15 milioni di euro; dal 1° gennaio 2023, alle opere di importo a base di gara pari o superiore a 1 milione di euro; dal 1° gennaio 2025, alle nuove opere di importo a base di gara inferiore a 1 milione di euro. A queste necessità, si sommano quelle della visualizzazione su mappa delle informazioni, attraverso l'analisi dei dati disponibili: ad esempio utilizzando l'indirizzo alfanumerico, il civico e il codice postale per effettuare il geo-coding e aggregare i punti per zone, quartieri, regioni e nazioni. Abilitare spazialmente tutti i sistemi e i dati disponibili all'organizzazione interessata, fornisce una maggiore consapevolezza dell'operatività, offrendo capacità di analisi utili per comprendere le dinamiche della città, dei manufatti, delle infrastrutture e degli utenti. Si tratta quindi di avviare una trasformazione al settore GIS, solitamente confinato in un ufficio a sé stante,

in una commodity utilizzata da tutti gli altri settori e prendere consapevolezza del fatto che le organizzazioni operano naturalmente sul territorio e, di conseguenza, che ogni dato dovrebbe essere associato ad una posizione per la naturale integrazione delle informazioni. Inoltre, il digital twin ha il potenziale per offrire enormi vantaggi al settore energetico. La maggior parte delle aziende del settore energia dispone di buoni sistemi di gestione documentale a supporto dei processi normativi e, spesso, di buoni sistemi di gestione degli asset a supporto della manutenzione. Molti di questi dati, tuttavia, sono inaccessibili a coloro che ne hanno bisogno e spesso non sono aggiornati come dovrebbe essere. La definizione di strategie efficaci, con l'obiettivo di attivare un consumo consapevole dell'energia e di stimolare e supportare i processi decisionali per le ristrutturazioni energetiche sostenibili, dovrebbe iniziare con la definizione di una base di conoscenza organizzata sul comportamento energetico del patrimonio edilizio [213]. Uno strumento di questo tipo dovrebbe:

- trasmettere informazioni da diverse fonti, in particolare da dati geografici (mappe catastali, indagini LiDAR, dati vettoriali, ecc.) E dati energetici (certificati di prestazione, audit energetici e consumo energetico effettivo);
- avere la capacità di sintetizzare gli aspetti più influenti per una immediata comprensione preliminare del comportamento energetico generale del patrimonio edilizio;
- essere inclusivi rispetto agli utenti, fornendo le informazioni a tutti i tipi di parti interessate con l'obiettivo di coinvolgere sia i consumatori che i gestori nella promozione di usi più sostenibili [214];
- rappresentare la situazione reale e tracciarne i cambiamenti nel tempo, al fine di fornire dati statistici e prevedere le tendenze future [214];
- essere multiscalari per supportare ragionamenti dalla scala edilizia alla scala territoriale, secondo le esigenze delle pubbliche amministrazioni;
- fare uso di modelli di dati standard sia in input che in output per attivare flussi di lavoro replicabili diffusi e applicabili oltre i confini locali.

Utilizzare il 3D modeling come base per i digital twin, consente di acquisire le condizioni reali dei sensori, collegarle al modello e gestire operazioni di manutenzione, registrare le modifiche mantenendole sempre aggiornate, e fornendo una base solida per le fasi successive. Tali fasi potrebbero inoltre sfruttare l'intelligenza artificiale e il machine learning, per migliorare i processi manutentivi e operativi degli impianti. Questo campo offre innumerevoli possibilità di ricerca e di sviluppo, garantendo un futuro all'avanguardia e digitalizzato, in grado di contribuire attivamente alla creazione di città più intelligenti.

5.4-La condivisione aperta dati nel Cloud

La tecnologia applicata all'informazione territoriale è un cardine fondamentale per poter affrontare il tema delle smart city. Nei convegni internazionali si sente sempre più spesso parlare di come sia possibile trasformare le città in luoghi di produzione e riuso delle informazioni digitali, in modo da ottenere nuovi servizi all'avanguardia, sicurezza e qualità della vita. Creare città più intelligenti significa prendere decisioni di pianificazione più intelligenti, motivo per cui sfruttare tecnologie avanzate quali BIM e GIS riveste un ruolo così fondamentale [157]. Un esempio futuristico può rappresentare l'integrazione di sensori ai veicoli autonomi, in modo da raccogliere costantemente informazioni in tempo reale, su strade, traffico e inquinamento e riversarle nel cloud. Man mano che le vetture raccoglieranno informazioni aggiornate sulla geometria stradale, come la chiusura delle corsie o le modifiche dovute a lavori in corso, identificheranno le aree ad alto rischio, che possono essere fornite ai pianificatori che progettano e gestiscono le strade. O ancora, una delle applicazioni più utili dell'Internet of Things in ambito energetico è la gestione in remoto degli impianti termici, integrando software di monitoraggio, in modo da poter intervenire in tempo reale sulle principali regolazioni di funzionamento, effettuare analisi e fornire un riscontro immediato in caso di malfunzionamenti. Il collegamento di sistemi di sensori in tempo reale al gemello digitale attraverso strumenti quali IoT (Internet of Things), GIS e BIM (Building Information Modeling) migliorano la visione di tutti su piccola e grande scala. L'Internet of Things (IoT), ossia l'estensione di internet al mondo degli oggetti fisici, ha modificato profondamente la realtà in cui viviamo, e rappresenta oggi uno strumento prezioso nel raggiungimento di obiettivi di efficienza energetica con piattaforme di servizi finalizzate alla crescita economica e alla qualità di vita nelle città del futuro [156]. Grazie allo IoT è possibile realizzare una smart city in cui vi è una riduzione di consumi energetici, razionalizzazione nella produzione e redistribuzione delle risorse, facilitazioni negli spostamenti urbani, nonché, l'erogazione più efficiente e sistematica di nuovi servizi. In questa ricerca si cerca di porre le basi per raggiungere un flusso diretto da quello che è il singolo edificio alla moltitudine di manufatti, dall'efficienza energetica del fabbricato all'integrazione con il suo ambiente circostante, dalla pratica odierna alle possibilità che il futuro mette a disposizione.

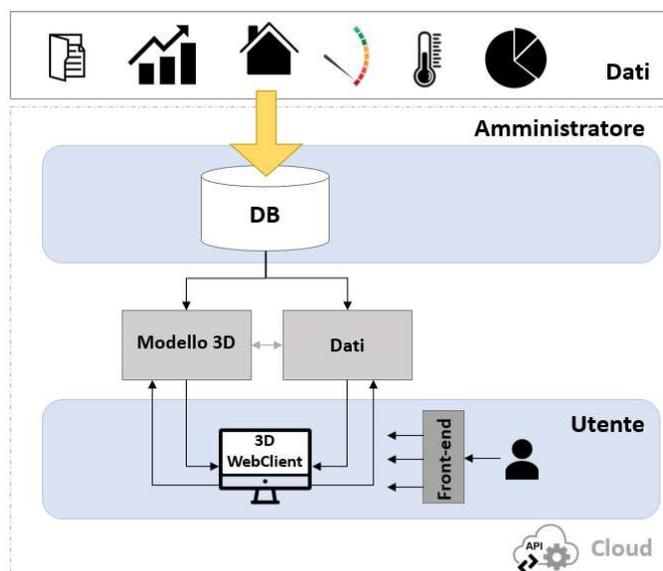


Figura 42:Workflow di condivisione Cloud

La soluzione scelta, in grado di fornire il supporto completo delle funzionalità di archiviazione e gestione dati cloud è il "Database città 3D" (3DCityDB), un database geografico open-source per modelli di città 3D basati sul formato CityGML, dotati di estensione web3D. È costituito da uno schema di gestione database-relazionale (ORACLE Spatial o PostgreSQL / PostGIS) con una serie di procedure che consentono di importare, gestire, analizzare, visualizzare ed esportare i modelli di città in Cloud, rendendoli accessibili all'utente finale (figura 42).

CAPITOLO 6: INTEGRAZIONE DEI DATI BIM PER LE SFIDE URBANE MODERNE – IL CASO STUDIO

6.1-La Modellazione multiscala (5 livelli di dettaglio, LOD)

CityGML supporta diversi livelli di dettaglio (LOD). I LOD devono riflettere processi di raccolta dati indipendenti con requisiti applicativi diversi, facilitando la visualizzazione e l'analisi dei dati efficienti (Fig. 58). In un dataset CityGML, lo stesso oggetto può essere rappresentato simultaneamente in diversi LOD, consentendo l'analisi e la visualizzazione dello stesso oggetto rispetto a diversi gradi di risoluzione. Inoltre, è possibile combinare e integrare due set di dati CityGML contenenti lo stesso oggetto in un LOD diverso [159]. Il livello più grossolano LOD0 è essenzialmente un modello digitale del terreno a due dimensioni, sul quale può essere drappeggiata un'immagine aerea o una mappa. LOD1 è un noto modello a blocchi composto da edifici prismatici con tetti piani. Al contrario, un edificio in LOD2 ha strutture di copertura differenziate e superfici differenziate tematicamente. Possono essere rappresentati anche oggetti della vegetazione. LOD3 denota modelli architettonici con strutture dettagliate di pareti e tetti, balconi, campate e proiezioni. Le texture ad alta risoluzione possono essere mappate su queste strutture. Inoltre, la vegetazione dettagliata e gli oggetti di trasporto sono componenti di un modello LOD3. LOD4 completa un modello LOD3 aggiungendo strutture interne per oggetti 3D. Ad esempio, gli edifici sono composti da stanze, porte interne, scale e mobili. Modello multiscala con 5 livelli consecutivi di dettaglio (LOD) ben definiti (figura 43)

- LOD 0 - regionale, paesaggistico
- LOD 1 - città, regione
- LOD 2 - quartieri cittadini, progetti
- LOD 3 - modelli architettonici (esterni), punti di riferimento
- LOD 4 - modelli architettonici (interni)

Uno dei principi di progettazione più importanti per CityGML è la modellazione coerente della semantica e delle proprietà geometriche / topologiche. A livello semantico, le entità del mondo reale sono rappresentate da caratteristiche, come edifici, muri, finestre o stanze. La descrizione include anche attributi, relazioni e gerarchie di aggregazione (relazioni parte-tutto) tra le caratteristiche. Quindi la parte di relazione tra le caratteristiche può essere derivata solo a livello semantico, senza considerare la geometria.

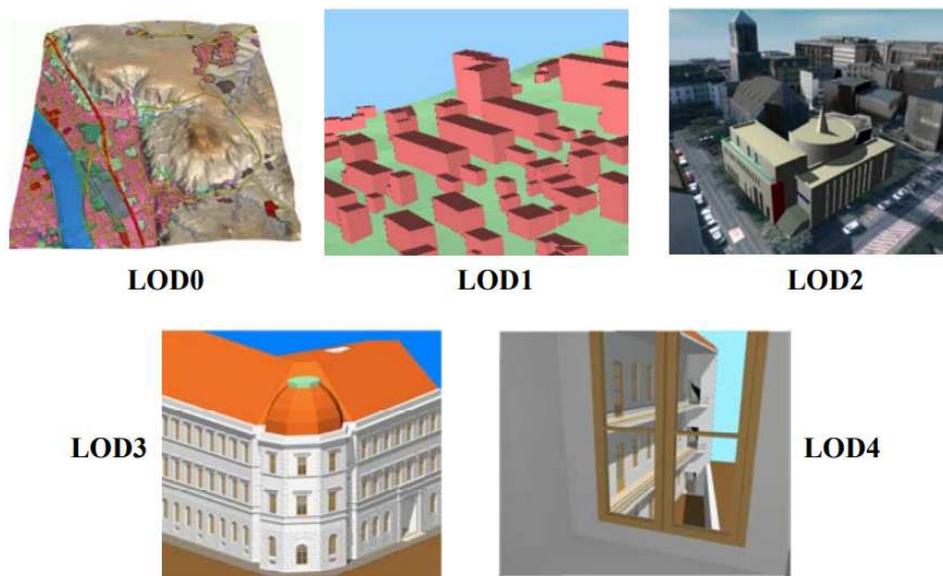


Figura 43: I Livelli di Dettagli (LOD) definiti dal CityGML (Source: IKG Uni Bonn)

Tuttavia, a livello spaziale, gli oggetti geometrici vengono assegnati alle caratteristiche che rappresentano la loro posizione spaziale e la loro estensione. Quindi il modello è costituito da due gerarchie: la semantica e la geometrica in cui gli oggetti corrispondenti sono collegati da relazioni. Il vantaggio di questo approccio è che può essere navigato in entrambe le gerarchie e tra le due gerarchie arbitrariamente, per rispondere a interrogazioni tematiche e / o geometriche o eseguire analisi. Se entrambe le gerarchie esistono per un oggetto specifico, devono essere coerenti (vale a dire è necessario assicurarsi che corrispondano e si adattino insieme). Ad esempio, se un muro di un edificio ha due finestre e una porta a livello semantico, la geometria che rappresenta il muro deve contenere anche le parti geometriche sia delle finestre che della porta. L'esportazione geometrica e informativa derivante dal BIM sottintende la correttezza e la congruenza delle informazioni sia geometriche che semantiche.

6.2-I Formati di scambio

In questa ricerca è presentata una soluzione GIS 3D basata sul Web che consente di collegare modelli di informazioni sull'edificio BIM trasformato in CityGML grazie all'utilizzo di applicazioni di trasformazione e integrazione. Lo standard aperto dei sistemi GIS è prodotto dall'Open Geospatial Consortium (OGC) [158] e consiste in una lunga serie di formati di interscambio per i sistemi informativi territoriali, Tra i più importanti troviamo:

- OGC Web Map Service (WMS)
Web service che a partire da informazioni geografiche produce mappe di dati

spazialmente riferiti in modo dinamico. Il risultato è generalmente un'immagine raster in formato PNG, GIF o JPG.

- OGC Web Feature Service (WFS)
Web service che attraverso l'utilizzo di chiamate parametrizzate restituisce gli oggetti geografici in formato vettoriale. Viene utilizzato il formato standard aperto OGC GML, basato su XML, per la restituzione dei dati ma sono possibili anche altri formati come Spatialite e Shapefile.
- OGC Geography Markup Language (GML)
Grammatica XML standard per esprimere oggetti geografici. Serve sia come linguaggio di modellazione che come formato aperto di interscambio di dati e transazioni geografiche.
- OGC Catalog Service for the Web (CSW)
Web service per ricerca, navigazione e interrogazione di metadati su dati, servizi e altre risorse potenziali. Assume una grande importanza alla luce della direttiva comunitaria europea INSPIRE

In questa ricerca i modelli 3D di città virtuali vengono gestiti secondo lo standard CityGML permettendo di includere intere città in un formato di facile scambio. L'importanza di disporre di un formato aperto dipende dalle sue caratteristiche di disponibilità e accessibilità del dato, riuso, redistribuzione e partecipazione universale. Queste caratteristiche permettono ai dati di essere sempre disponibili nella loro completezza anche a seguito di un download. Il CityGML è un formato di scambio di dati basato su XML che descrive gli oggetti urbani e paesaggistici più rilevanti insieme ai loro attributi spaziali e non, alle relazioni e alle loro complesse strutture gerarchiche in cinque livelli di dettaglio. I modelli di città 3D, strutturati secondo CityGML, vengono spesso utilizzati per varie complesse attività di simulazione e analisi GIS, che vanno ben oltre la pura visualizzazione 3D. Un secondo formato utilizzato in questa ricerca per la visualizzazione cloud è COLLADA (acronimo di COLLABorative Design Activity) è un formato file di interscambio tra applicazioni 3D distribuito gratuitamente insieme al codice sorgente dall'organizzazione no-profit Khronos Group Inc. Anche questo formato file è realizzato in codice XML e permette di essere visualizzato all'interno del web client di 3DCityDB.

6.3-Caso Studio 4

6.3.1-Introduzione

Nella moderna progettazione e gestione urbana, trattare le informazioni su diverse scale territoriali sta ricoprendo una particolare sfida innovativa che vede numerosi professionisti odierni impegnati a consolidare il nuovo flusso di lavoro. La creazione, la

manipolazione e l'analisi dei dati geografici, ricoprono un campo di ricerca attuale, in quanto mai prima d'ora sono esistiti così tanti dati leggibili da parte delle macchine, e la loro elaborazione sta portando alla ricerca di nuovi modi di utilizzo per contribuire al processo decisionale. Integrazione dei dati significa combinare le informazioni provenienti da varie fonti e trasformarle in qualcosa di utile rendendoli disponibili a chi ne ha bisogno, e permettendo di gestirli accuratamente. Il punto focale delle ricerche risiede nella capacità di ottenere dalle strutture urbane accesso contemporaneamente alle informazioni dal livello micro (asset) e dal livello macro (quartiere), figura 44.

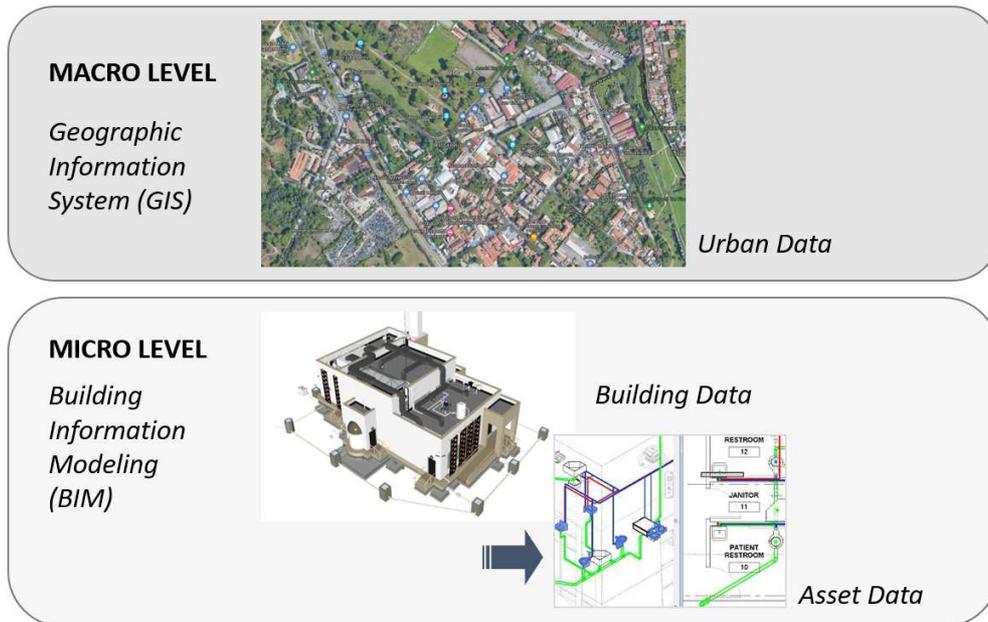


Figura 44:Le sScale di riferimento per l'integrazione BIM-GIS

Al momento, tuttavia, questi due livelli di informazione sono trattati come due ambiti separati e, di conseguenza, i loro standard e strumenti di informazione sono stati sviluppati indipendentemente. L'integrazione di BIM e CityGML è un passaggio necessario per creare un modello 3D completo di un'area urbana con informazioni dettagliate sull'edificio. In altre parole, tale integrazione è necessaria per sviluppare un'infrastruttura che consenta l'accesso a informazioni sia a livello micro che a livello macro allo stesso tempo. Combinando modelli 3D di oggetti urbani come edifici, terreno, vegetazione e corpo idrico con dati climatici locali, le aziende o i professionisti e ricercatori potrebbero ottimizzare, ideare o testare teorie sugli aspetti di consumo energetico, comfort termico, illuminazione diurna e ventilazione naturale etc. I risultati della simulazione potrebbero non solo essere utilizzati per giustificare l'approccio progettuale nella fase iniziale, ma giocare anche un ruolo importante nella successiva operazione di progetto e nel processo di gestione. Oltre alla valutazione dei comportamenti energetici, la mancanza è per lo più legata alla possibilità di archiviare e gestire i dati esistenti in un ambiente georeferenziato. È frequente, infatti, che gli

operatori nel campo del facility management siano già consapevoli del comportamento energetico dei propri beni, avendolo rappresentato da una grande mole di dati non strutturati, o, nel migliore dei casi, da banche dati organizzate che non fanno alcun riferimento alla relazione tra geometria e informazione. Da questo quadro deriva la necessità di fornire una piattaforma unificata per la raccolta e la consultazione delle informazioni, con l'obiettivo di definire un database spaziale in grado di rappresentare informazioni multi-livello destinate a tipologie differenti di utenti. Lo studio si concentra principalmente sull'utilizzo di FME per la trasformazione dati da formato file IFC a CityGML e 3DcityDB come database che raccoglie le proprietà spaziali e i dati semantici dei modelli di città 3D.

6.3.2-Metodologia

Questo studio mira a implementare il processo di interoperabilità BIM-GIS attraverso l'utilizzo di software commerciali a partire da un modello Revit. A causa del notevole impatto che l'era tecnologica sta portando nel contesto della progettazione, si vuole investigare una strada di implementazione IT al settore edilizio usufruendo delle notevoli possibilità offerte dalla geo-referenziazione. La ricerca attuale mostra come gli accordi sulle informazioni dell'edificio e la disponibilità del dato possano migliorare di gran lunga il processo di progettazione, archiviazione, e gestione dei manufatti, orientando il futuro verso città più intelligenti. È riportato il flusso di lavoro metodologico (figura 45) adottato per la presente ricerca:

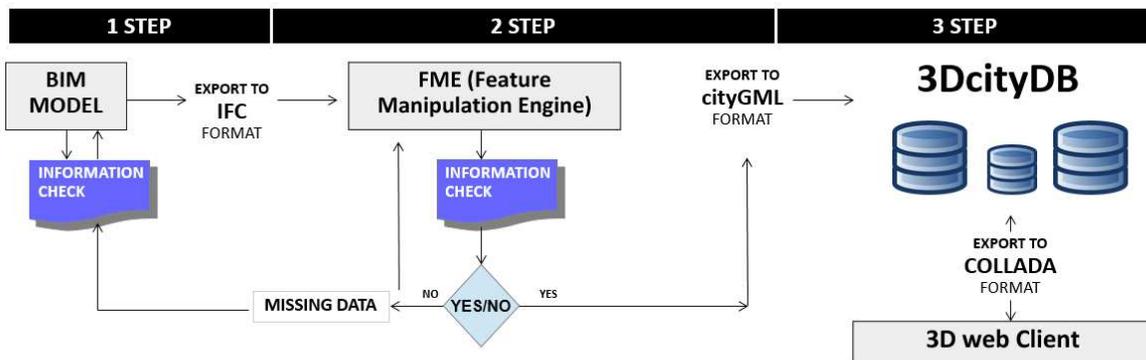


Figura 45:Workflow del processo di trasmissione al WebClient

- Nella prima fase è stato creato il modello architettonico Autodesk Revit del caso studio complesso. Esso rappresenta un sistema di 4 villette unifamiliari disposte in un singolo lotto e dotate di impianti energetici avanzati. Tutti i dati di tipo geometrico e fisico utilizzati per simulare il caso studio sono stati riportati all'interno del modello 3D, dal quale successivamente, è stato possibile generare

il file IFC. Oltre al caso studio complesso, sono stati presi in considerazione i file IFC generati dal caso studio Test e dal caso studio Semplice.

- il secondo passaggio ha visto l'utilizzo del software FME per la trasformazione del formato file IFC nel CityGML, necessario al collegamento con il database spaziale di tutti i modelli RVT.
- il terzo passaggio ha visto la creazione del database attraverso l'interfaccia grafica semplificata di pgAdmin, e la sua trasformazione in COLLADA per l'importazione nel Web Client geo-referenziato.

Di seguito è riportata l'immagine del caso studio preso in esame (figura 46).

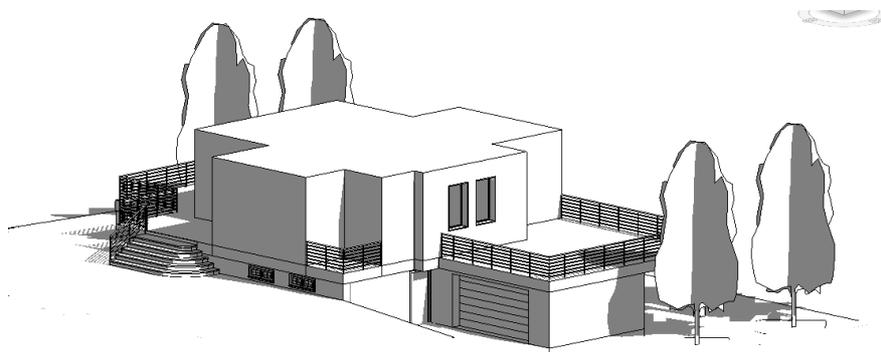


Figura 46: Modello Revit Villetta

FME (Feature Manipulation Engine)

FME è uno strumento di integrazione dei dati utilizzato per la loro stessa trasformazione in output differenti, è distribuito da Safe Software a partire dal 1993 con lo scopo di aiutare le aziende forestali a scambiare mappe territoriali con il governo provinciale. L'integrazione dei dati consente la combinazione e l'analisi attraverso "silos" isolati in cui normalmente sarebbe difficile collaborare. Grazie a questo software è stato possibile realizzare l'integrazione dei dati leggendoli da più fonti, utilizzando gli strumenti di trasformazione per ristrutturarli e riscriverli in un formato di destinazione. Sono supportati numerosi tipi e formati di dati: Excel, CSV, XML e database, oltre a vari tipi di formati di mappatura tra cui GIS, CAD, BIM e molti altri. La capacità di supportare così tanti tipi di dati è resa possibile da un modello che gestisce contemporaneamente le differenti geometrie e gli attributi. L'immagine sottostante (figura 47) mostra le più comuni conversioni in ambito GIS. L'intero pacchetto è costituito da FME Desktop (Workbench + Data Inspector), FME Server e FME cloud. Come Dynamo o Grasshopper, fornisce un'interfaccia di programmazione visiva (figura 48): è sufficiente trascinare i dati e gli strumenti di trasformazione predefiniti nell'area di lavoro e collegarli correttamente a blocchetti personalizzati.

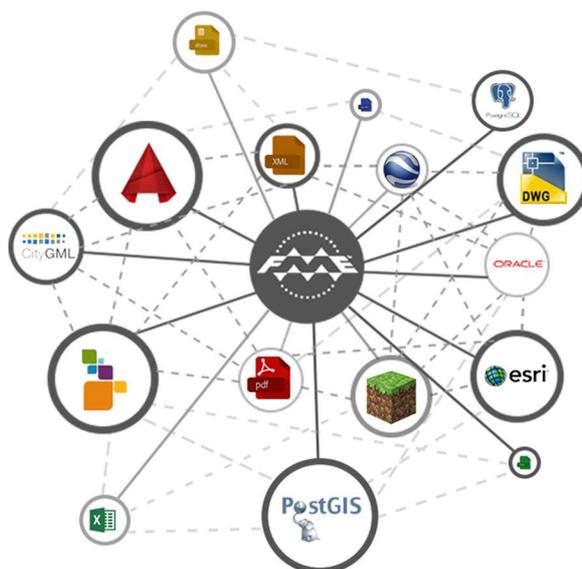


Figura 47: Formati di interscambio di FME

È inoltre possibile definire degli script da eseguire prima dell'inizio della trasformazione in modo da ottenere il livello di dettaglio desiderato che va oltre l'utilizzo degli elementi preimpostati. Grazie all'impostazione e alla codifica di Reader e Writer è stato possibile riconoscere automaticamente la fonte di dati per una sovrascrittura del formato di output. Pertanto, il primo passaggio in FME è stato quello di inserire un Industry Foundation Class STEP/XML Files (IFC) Reader in grado di leggere il codice sorgente esportato direttamente dai modelli RVT prodotti dalle precedenti ricerche. Dopo essere stati importati in FME, gli attributi di geometria dei dati IFC vengono trasferiti automaticamente tramite blocchetti specifici, in mesh e poi in FME Multiple-Surface. Nella presente ricerca, il file di input ("Reader") è il IFC, e come file di output, viene impostato il formato dati GML, conforme allo standard CityGML. Il file .IFC è stato definito seguendo la sua struttura gerarchica, per cui è stato necessario impostare il "Reader" per leggere tutte le caratteristiche del IFC e per popolare la tabella contenente i campi "id", "parent_id" e "feature_type". Successivamente è stato applicato "AttributeRenamer", che permette l'associazione manuale degli attributi "Id" di .IFC a quelli di GML. Successivamente, per ogni dato geometrico ("IfcWindow", "IfcBuildingElementProxy", "IfcDoor", "IfcRoof", "IfcSlab", "IfcWallStandardCase" e "IfcWall") è stata adottata la stessa combinazione di trasformatori. Poiché nello standard IFC le geometrie sono composte da "solidi", mentre in CityGML sono rappresentate come "multisuperfici", è stato necessario inserire un convertitore interno. Per scrivere con successo gli attributi della geometria nelle tabelle di 3DCityDB, dopo aver letto i dati IFC in FME, l'attributo Geometria (in Multi-Superfici) deve essere riaggregato, geo-localizzato e quindi scritto nelle tabelle del database in formato CityGML. Pertanto, vengono inseriti i blocchetti di Local CoordinateSystem Setter,

Reprojector e quindi il Writer come Building CityGML. La Figura 48 mostra un'anteprima del flusso di lavoro FME per il processo di trasformazione della geometria.

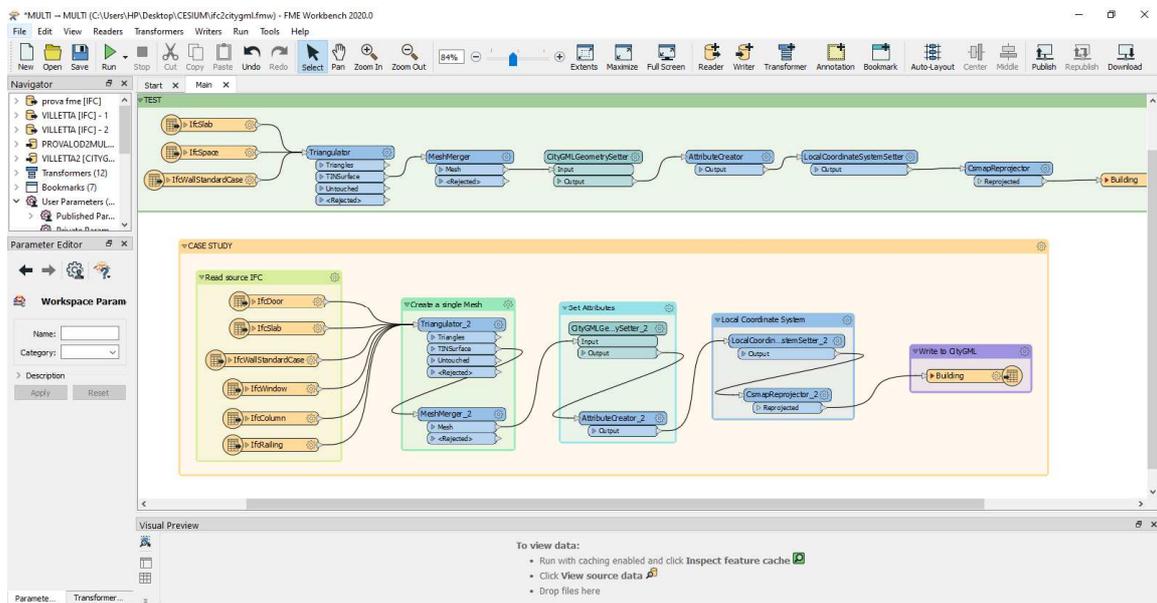


Figura 48: Interfaccia di lavoro di FME Software

Per la georeferenziazione automatica del modello parametrico 3D nell'area geografica corretta, sono state effettuate delle trasformazioni di coordinate contenenti le proiezioni spaziali di latitudine e longitudine nel sistema UTM — WGS84 33N (EPSG: 32633). Sono stati effettuati diversi test di interoperabilità al fine di verificare la completezza del modello standard e di integrare le informazioni in un'ulteriore fase di implementazione (figura 49).

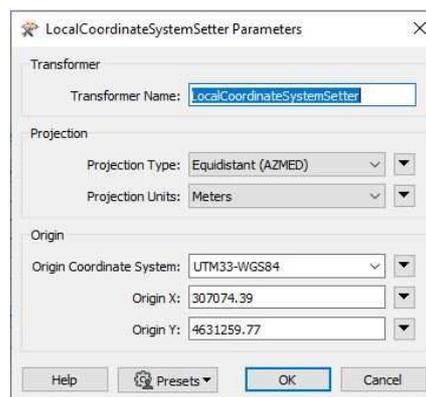


Figura 49: Impostazione sistema di coordinate

L'esportazione in CityGML può avvenire su più LOD, impostando un Workbench idoneo al grado di dettaglio che si vuole ottenere. In questa tesi si è scelto il dettaglio geometrico basso (LOD2) essendo il primo approccio all'argomento. Questa scelta ha

comportato la sola considerazione di tutte le caratteristiche geometriche, ma non delle informazioni di progettazione dell'edificio e fase di costruzione come stato di manutenzione, materiali, dati informativi. L'attuale semplificazione ha comportato la compilazione manuale delle informazioni all'interno del database, mentre un possibile studio futuro potrebbe riguardare il collegamento diretto dell'informazione dal Revit al database. Dopo aver ripetuto l'intera procedura per ciascuna funzionalità, è stato eseguito l'intero spazio di lavoro e ottenuto un file di output privo di errori. Il risultato finale del file è il CityGML ispezionabile sia nell'FME Data Inspector (un'utility che consente all'utente di visualizzare e salvare i dati convertiti in qualsiasi formato supportato da FME), sia verificabile direttamente all'interno di Google Earth (figura 50). Nel Data Inspector, le informazioni relative al modello 3D possono essere interrogate e destrutturate nell'albero di controllo, verificando caratteristiche e la geo-localizzazione.

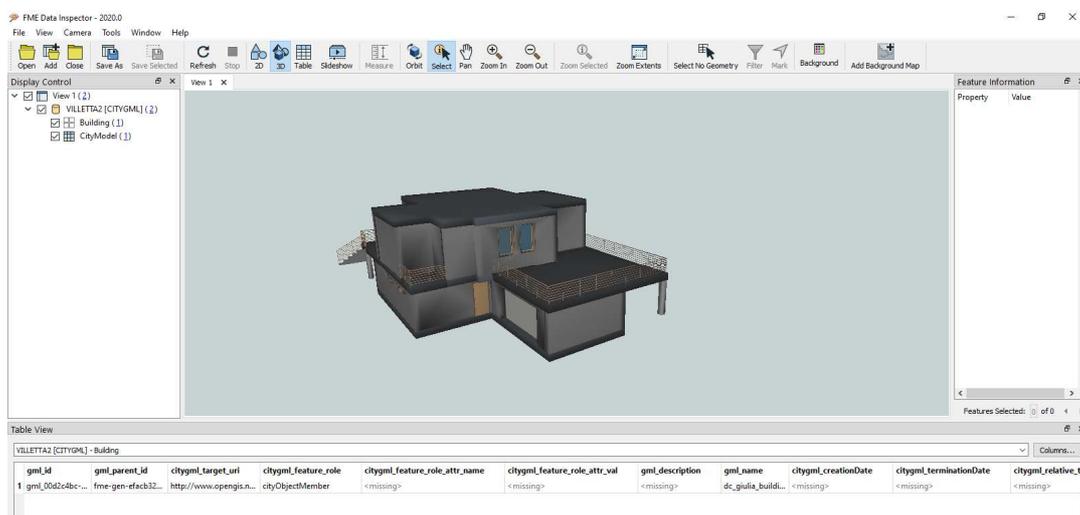


Figura 50: Interfaccia Data Inspector di FME

3DCityDB (3D City Database)

Grazie alle caratteristiche intrinseche dei Sistemi Informativi Geografici, ogni geometria definita nell'ambiente tridimensionale è collegata ad una riga in una tabella, in modo che ad essa possa essere associato un insieme di informazioni definite dall'utente. Nel caso specifico, per collegare i dati energetici agli elementi solidi rappresentativi degli edifici esistenti, è sufficiente sfruttare la presenza di un campo comune tra l'insieme dei dati spaziali e quello energetico. Si tratta della selezione di un identificatore univoco che etichetta ogni edificio da utilizzare come chiave nel processo di unione dei dati. Una volta completato il modello nella sua parte geometrica e informativa, è pronto per essere visualizzato e navigato attraverso un'interfaccia grafica. Ai fini di questo studio è stato scelto uno strumento web-based per definire una piattaforma facilmente condivisibile tra gli attori coinvolti nella gestione e nell'utilizzo del patrimonio edilizio. In

questa direzione la scelta è ricaduta sul prodotto 3DCityDB, ovvero un database geografico open-source basato su PostgreSQL con l'estensione PostGIS e Oracle Spatial. Il suo scopo è memorizzare, rappresentare e gestire modelli 3D di città e paesaggi rappresentati secondo lo standard CityGML. 3DCityDB è costituito da tre componenti principali: in primo luogo, lo schema del database, che rappresenta le proprietà spaziali e i dati semantici dei modelli di città 3D, supporta CityGML 1.0-2.0, LoD0-4, dati di aspetto, modelli digitali del terreno (DTM) e altro. In secondo luogo, è stato utilizzato lo strumento Importatore / Esportatore importare ed esportare i modelli citygml. Da questo è possibile inoltre creare formati KML, COLLADA e glTF per scopi di visualizzazione in diversi browser di globo digitale come Google Earth o CesiumJS. Il database è in grado di caricare e scaricare dinamicamente grandi modelli di città 3D, gestendo diversi livelli di modelli e può essere collegato a fogli di calcolo online come i fogli di calcolo di GoogleSheet. I modelli vengono visualizzati in modo interattivo recuperando i dati automaticamente, una volta che viene selezionato l'edificio da interrogare sul globo. A seguito della corretta procedura di impostazione del sistema di gestione del database PostgreSQL (DMBS) con la sua estensione PostGIS viene utilizzato pgAdmin che consiste in una interfaccia grafica semplificata che consente di amministrare in modo più rapido il database di PostgreSQL. PgAdmin permette di creare un database da zero, creare le tabelle ed eseguire operazioni di ottimizzazione sulle stesse. L'intero pacchetto software è open source, basato su java script, e l'installazione degli stessi ha richiesto notevole tempo e conoscenza delle principali basi di programmazione. In primo luogo, il CONNECTION_DETAILS.bat deve essere editato con un editor di testo e aggiornato con i dati del database creato. Aggiornati gli elementi di re-indirizzamento viene avviato lo script CREATE_DB.bat inserendo lo SRID (Spatial Reference Identifier) e L'EPSG di riferimento. La georeferenziazione del modello è avvenuta tramite trasformazione di coordinate da latitudine, longitudine in WGS84, pertanto tramite applicativi web è stato possibile definire "32633" come SRID e "3857" come EPSG (European Petroleum Survey Group). Una volta immesso l'"urn: ogc: def: crs, crs: EPSG: 32633, crs: EPSG: 3857" nella riga di comando si attiva il collegamento con il database (figura 51). Se i parametri richiesti sono stati inseriti correttamente, le informazioni dell'istanza 3DCityDB connessa al database appaiono nella finestra della console sul lato destro dell'interfaccia utente dello strumento Importatore/Esportatore come riportato in figura 52. Prima dell'importazione, i file CityGML devono essere convalidati rispetto allo schema XML CityGML. È consigliato importare nel database solo i file CityGML che hanno superato con successo la convalida, poichè potrebbero crearsi errori o comportamenti imprevisti. Nel percorso del caso studio il passaggio di convalida ha permesso di riconoscere degli errori di esportazione proveniente da FME, il quale ha permesso successivamente di investigare il processo di trasformazione in Multiple-Surface, dapprima ignorato.

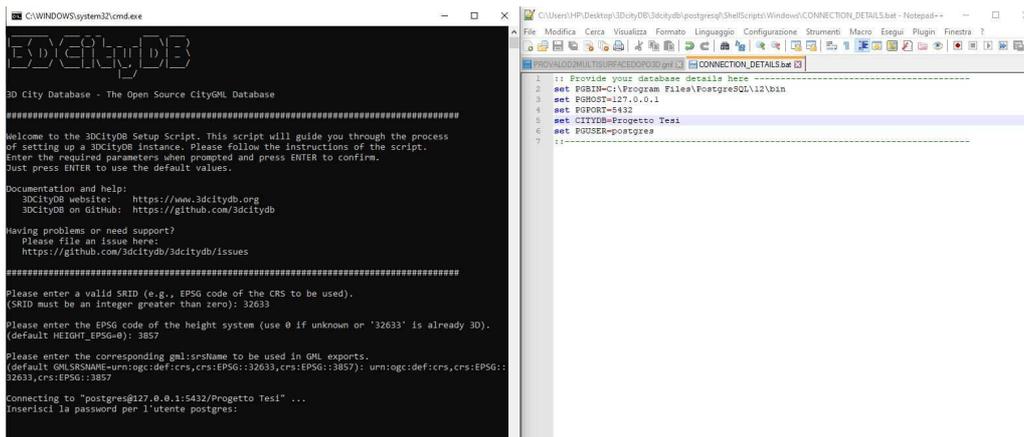


Figura 51: Configurazione 3DCityDB

Dopo aver completato con successo il processo di convalida è possibile avviare l'importazione. Nella finestra della console viene quindi visualizzato l'elenco riepilogativo che enumera i tipi e il numero delle funzionalità di primo livello CityGML importate (figura 52).

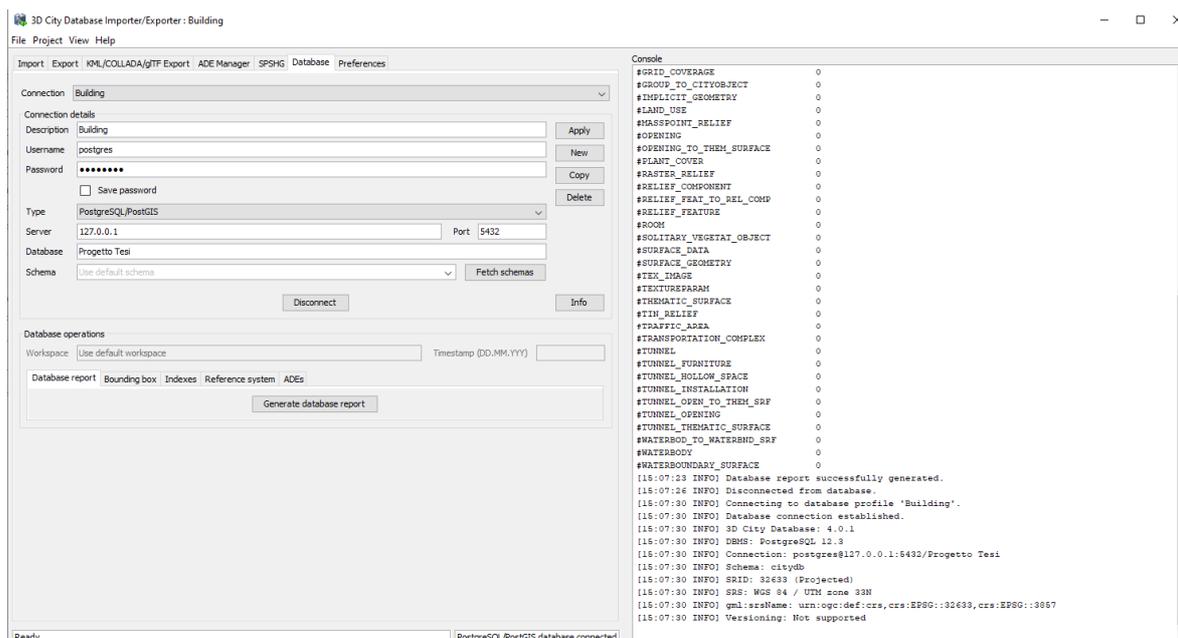


Figura 52: Connessione al database pdAdmin

Per il sistema di riferimento e la geolocalizzazione, i valori delle coordinate dell'angolo inferiore sinistro (Xmin, Ymin) e superiore destro (Xmax, Ymax) del Building Box, o riquadro di delimitazione degli edifici, è generato automaticamente nei campi dei valori delle coordinate, in funzione della geolocalizzazione impostata in FME, della finestra di dialogo (figura 53).

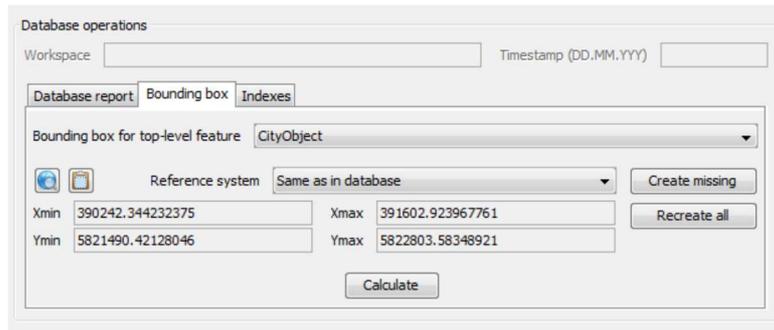


Figura 53: Delimitazione degli edifici e lettura delle coordinate

A questo punto, una volta che il database è stato correttamente generato può essere accuratamente riempito (figura 54). Le informazioni sono state riempite manualmente per semplificare il primo approccio al processo di trasmissione, ma diverse ricerche dimostrano che è possibile collegare le informazioni provenienti dal file IFC direttamente nel database. Questo aspetto sicuramente ricopre un interessante sviluppo per le ricerche future.

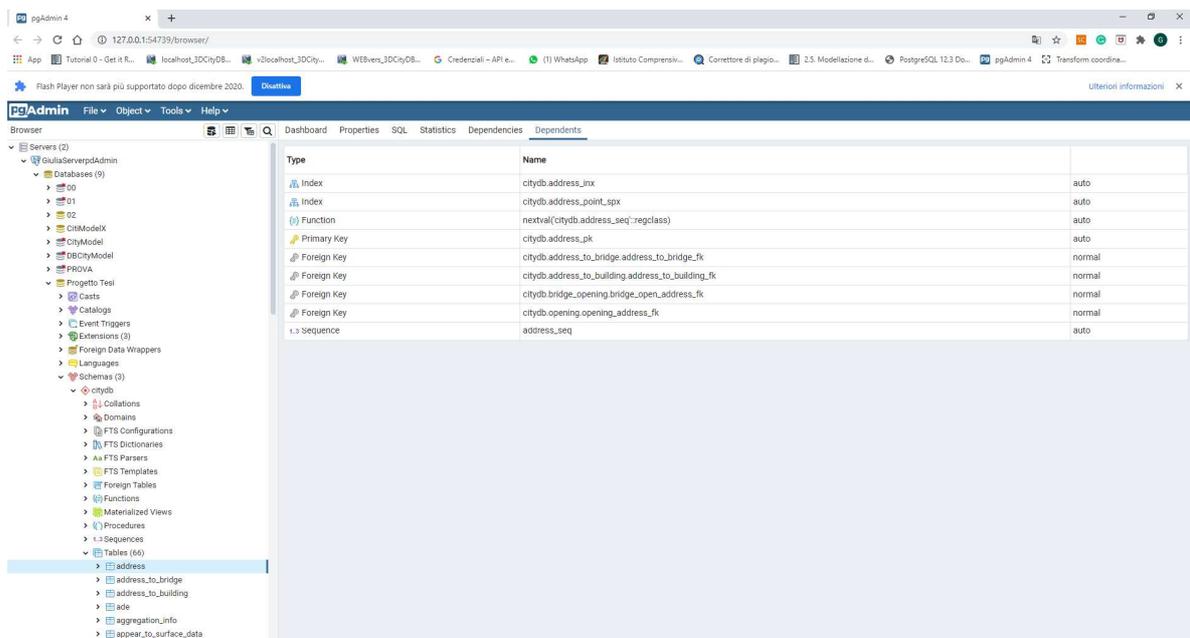


Figura 54: Interfaccia database pgAdmin

Utilizzando il plug-in SPSHG (Spreadsheet Generator), è possibile esportare i dati del 3D City Database (3DCityDB) in un file CSV / XLSX. Il file CSV o XLSX può successivamente essere importato in un'applicazione per fogli di calcolo (come Microsoft Excel o Open Office Calc) o in un servizio di fogli di calcolo online basato sul Web (come GoogleSheet). Con i fogli di calcolo online esistono funzionalità di condivisione online e la collaborazione in tempo reale con altri utenti e sono facilmente accessibili a tutti. Di conseguenza, una serie di informazioni accuratamente selezionate all'interno del

database (figura 55) ed è stata esportata e caricata in un GoogleSheet online per poi essere connesse al modello di città.

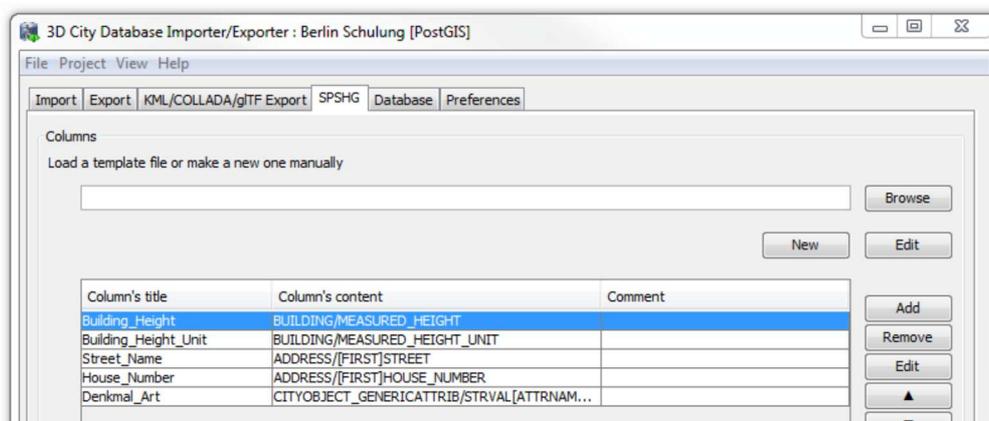


Figura 55: SPSHG Plug-in

La prima colonna del foglio di calcolo memorizza sempre l'identificatore univoco (GMLID) che identifica univocamente gli elementi del Citygml, per poi caricare dati informativi e geometrici per la loro visualizzazione nel Web Client online. Infatti, lo stesso pacchetto software 3D City Database fornisce un client Web 3D interattivo (3DCityDB-Web-Map-Client) utilizzando il framework Cesium Virtual Globe che si basa sulla tecnologia HTML5 e WebGL. Il client Web 3D collega i modelli di visualizzazione 3D esportati in formato KML / COLLADA / glTF con fogli di calcolo online esportati utilizzando il generatore di fogli di calcolo 3DCityDB e consente la visualizzazione interattiva e l'interrogazione di oggetti e dei loro dati tematici. La configurazione del client Web 3D sul computer avviene anche essa per mezzo del prompt dei comandi, digitando il preinstallato "node server.js" per eseguire il server locale (figura 56).

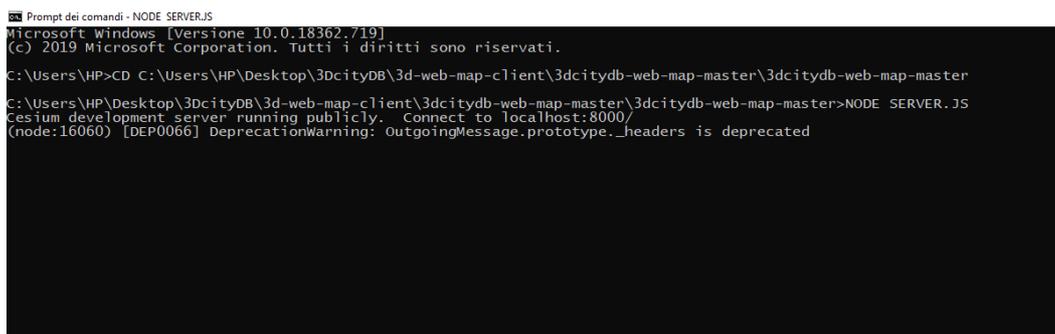


Figura 56: Collegamento al localhost8000

Una volta aperto il browser Web occorre accedere al client Web 3D inserendo l'indirizzo di collegamento nella barra degli indirizzi legato al localhost generato. <http://localhost:8000/3dcitydb-web-map/3dwebclient/index.html> (figura 57). A collegamento stabilito è possibile visualizzare l'interfaccia utente del client web nel quale caricare il file COLLADA esportato dall'Importer/Exporter.



Figura 57: Interfaccia del WebClient basato su Cesium

Si possono aggiungere diversi livelli al client Web, in questo caso è stata collegata la villetta (figura 58), e inserito al Thematic Data Source il Google Sheet API che permette un collegamento diretto alle informazioni. Per farlo è prima necessario creare un account API, creare delle credenziali e dotare l'indirizzo IP delle chiavi di accesso e delle autorizzazioni ai fogli di Google (figura 59).

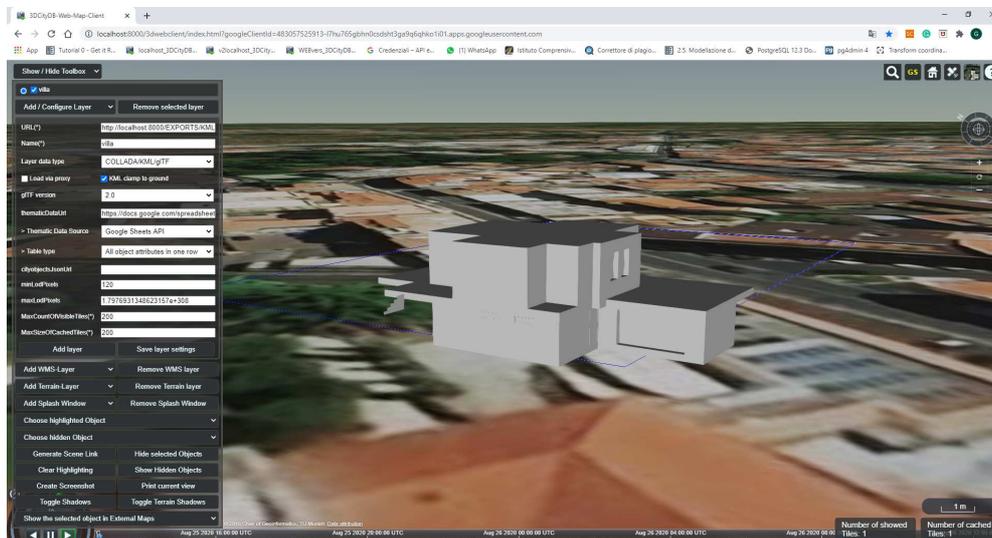


Figura 58: Importazione del caso studio

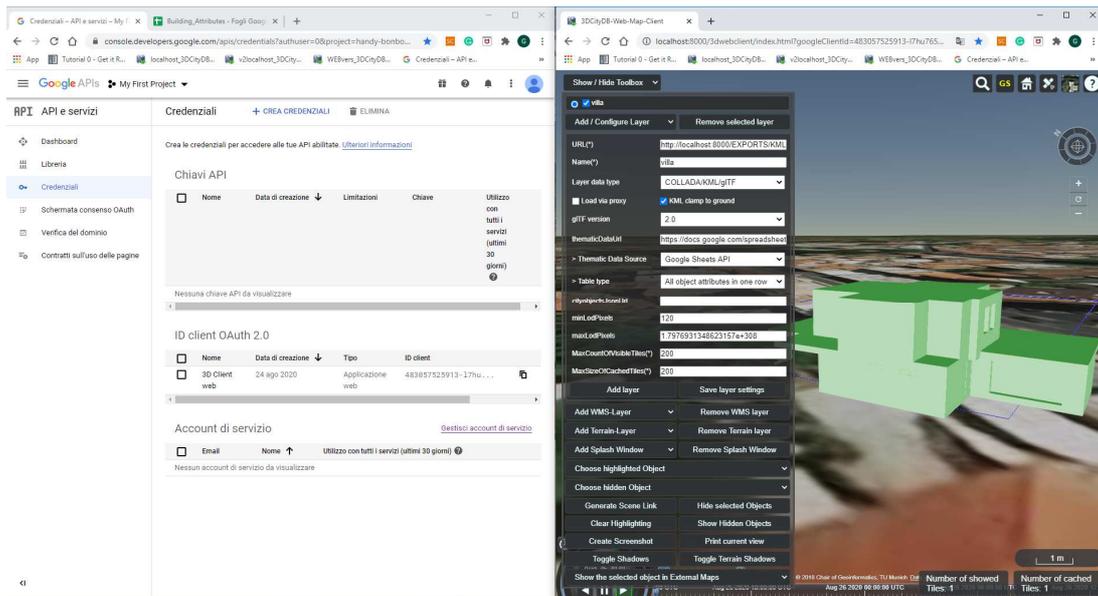


Figura 59: Connessione al database pdAdmin

Tale processo però ha riscontrato un'ulteriore esportazione in formato Excel da caricare nel Google Sheet, pertanto, è stato studiato e selezionato un secondo metodo di collegamento più immediato, basato su RESTAPI. Questo permette a delle funzionalità esposte da un server di essere invocate da programmi esterni via rete (Web Service) e a seguito di elaborazione restituire un risultato. In questo caso sono state generate all'interno pgAdmin delle apposite viste (Test View) all'interno del quale, sono state raggruppate le informazioni prescelte per apparire all'interno delle schede informative del Web Client Cesium. Nel dettaglio, sono stati creati dei codici script che permettono la selezione puntuale delle informazioni di Street, House_Number, City, Building_Generic_Information, Building_Energy_Information (figura 60).

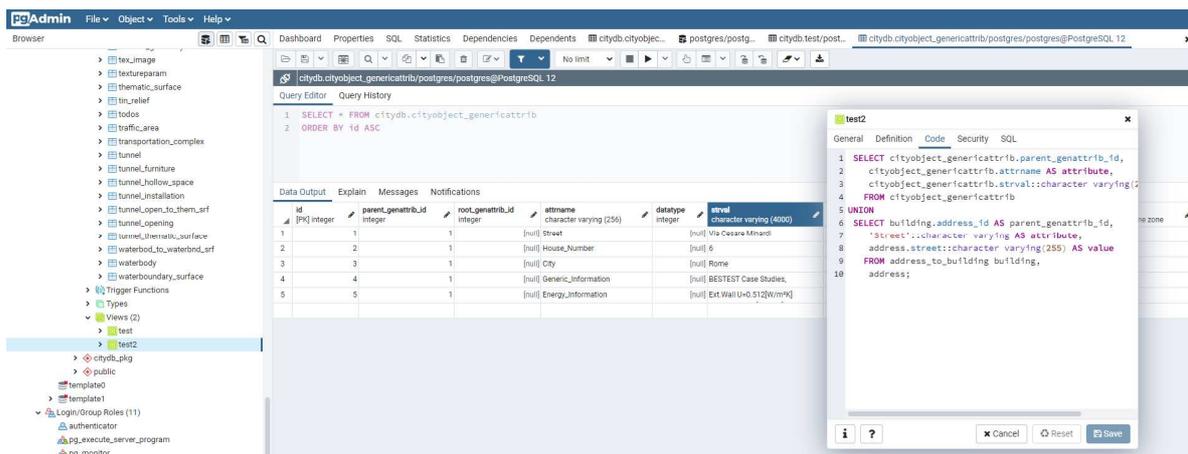


Figura 60: Connessione al database pdAdmin

6.3.3-Risultati e discussione

Attraverso la metodologia proposta viene assicurato un buon livello di interoperabilità attraverso la conversione di un oggetto nel formato standard Citygml a partire dall'IFC, mantenendo tutte le informazioni relative alla geometria e alla semantica (in questo caso però dotato successivamente). La prima fase di creazione del formato file IFC, per i casi studio affrontati non ha riscontrato problemi, avendo già precedentemente investigato la procedura per una corretta digitalizzazione. Il trasferimento e la trasformazione del dato dal formato file IFC a CityGML ha richiesto del tempo di studio per elaborare e mettere insieme i corretti nodi di script al fine della corretta trasmissione. È stata realizzata una vasta quantità di prove che ha portato il processo ad interrompersi diverse volte, prima nel Data Inspector di FME, poi all'interno della validazione CityGML del database 3DcityDB. All'interno di questo ultimo è stato possibile individuare il problema, grazie all'elenco degli errori e dei riferimenti persi. Attraverso la trasformazione del nodo lod2Solid in lod2MultiSurface, è stato possibile ottenere la corretta trasmissione delle informazioni geometriche. È stato impiegato diverso tempo per studiare nozioni base di georeferenziazione territoriale e di trasformazione delle coordinate spaziali. Una volta all'interno del database, sono state riempite le tabelle informative degli edifici importati e create le apposite viste di collegamento RESTAPI al Web Client. Anche questa parte è risultata inizialmente un ostacolo per le nozioni di programmazione, ma alla fine è stato possibile generare una corretta scheda informativa collegata all'edificio selezionato (figura 61). Il primo esempio importato è il gruppo di quattro villette disposte in un singolo lotto e dotate di un sistema impiantistico ibrido con pompe di calore. Selezionando il gemello digitale del micro assett, appare una corretta scheda infografica in cui sono elencati la localizzazione (via, civico e città), le informazioni generali legate alle caratteristiche informative dell'edificio (tipologia, area calpestabile, principali elementi costruttivi, anno di costruzione, intervento di ristrutturazione, etc..) e infine caratteristiche energetiche (trasmittanze principali elementi costruttivi, sistema impianto, efficienze, classe energetica). Ciascun edificio è identificato da un gmLID alfanumerico unico che schedula e tabella correttamente il database. Tale collegamento avvenuto con RESTAPI è automatico e non necessita di aggiornamento, infatti, nel momento in cui nel database vengono apportate delle modifiche ai dati interrogati all'interno delle viste, basta deselegionare e selezionare l'oggetto da interrogare nel Web Client e la scheda infografica si aggiorna contemporaneamente. Il processo avviene tramite il collegamento diretto creato al database e leggibile tramite [http://localhost3000/\(view _name\)](http://localhost3000/(view _name)) nel Thematic Data Source del Configure Layer del Toolbox.



Figura 61: Visualizzazione nel Web-Client del caso studio delle quattro villette

La stessa procedura è stata impostata per i 4 Bestest, per semplicità di visualizzazione, la località è stata disposta nella stessa zona del caso delle villette, in un civico successivo. La figura 62 riporta la descrizione del caso studio 930 nel quale all'interno della scheda informativa sono riportati i dati generali di costruzione e i risultati energetici delle simulazioni di daylighting.

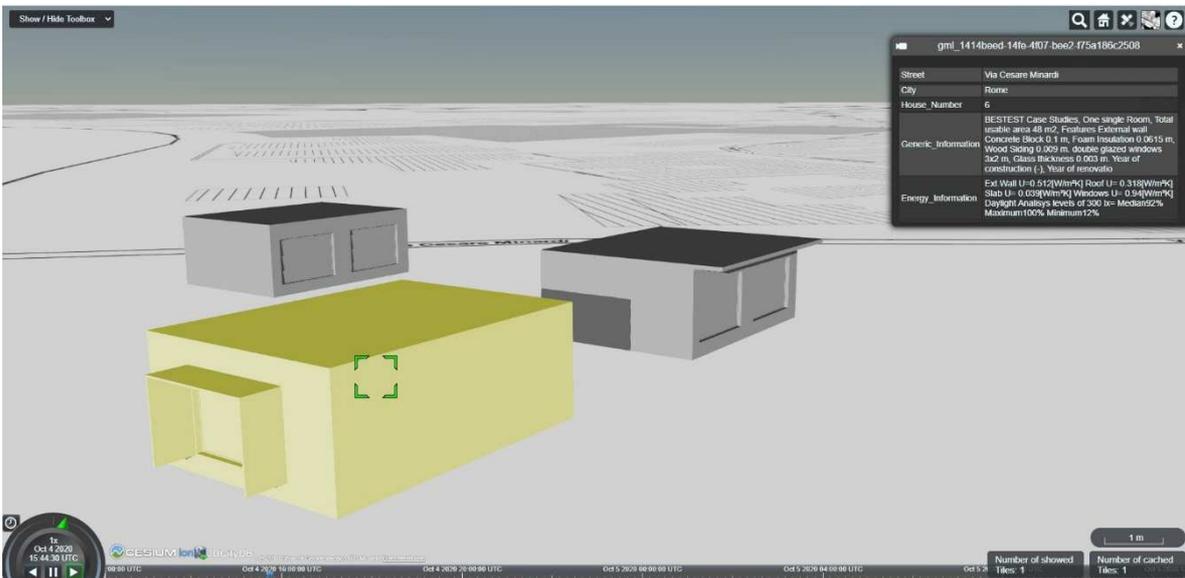


Figura 62: Visualizzazione nel Web-Client del caso studio dei quattro BESTEST

La piattaforma web rende disponibili tutte le informazioni definite nel modello 3D della città e permette di navigare tra gli attributi in modo da visualizzarne graficamente. Questa opportunità facilita la comprensione e la comunicazione dei dati grazie all'immediatezza di lettura realizzata dall'interfaccia grafica.

6.3.4-Conclusioni

La ricerca ha studiato l'implementazione di un flusso di interoperabilità BIM-GIS attraverso l'utilizzo di software commerciali quali FME e 3DcityDB a partire da file IFC estratti da modelli Revit. Lo scopo è stato quello di investigare una strada di implementazione IT al settore edilizio usufruendo delle possibilità offerte dalla georeferenziazione e dalla creazione di un modello digitale dell'edificio gestiti in un database. La ricerca dimostra come gli accordi sulle informazioni dell'edificio e la disponibilità del dato possano migliorare di gran lunga il processo di progettazione, archiviazione, e gestione dei manufatti, orientando il futuro verso città più intelligenti. Aggiungendo i dati BIM al GIS, i manufatti possono essere inseriti nel loro reale contesto, in una panoramica più smart, creando un ambiente governabile che racchiude differenti scale di livello macro-micro. Il risultato è quello di ottenere un edificio dettagliato collocato nella sua reale posizione spaziale quindi nel suo contesto urbano. Quando si mettono insieme queste due scale relative e si spostano le informazioni senza interruzioni o perdite di dati tra di esse, si elimina la ridondanza e si ottimizza il flusso di coscienza. Nonostante la ricerca sia basata su un primo approccio al tema, ne è stato riscontrato un grande valore, soprattutto nei confronti del Digital City. Orientandoci sui temi energetici sono state svolte delle ricerche per possibili risvolti futuri, che per mancanza di tempo non è stato possibile affrontare. Nel dettaglio, tramite l'estensione Application Domain Extensions (ADE): a seconda delle specifiche esigenze, è possibile aggiungere nuove funzionalità o proprietà al Citygml. L'obiettivo di Energy ADE è fornire un modello di dati unico e standardizzato per superare, da un lato, i problemi di interoperabilità dei dati sopra menzionati e, dall'altro, per consentire sia simulazioni energetiche dettagliate di un singolo edificio che di tipo urbano. L' Energy ADE si concentra principalmente sull'edificio, sulle sue proprietà fisiche e sugli impianti in esso installati e non ricopre infrastrutture energetiche urbane centralizzate, come il sistema di teleriscaldamento o le reti del gas che possono invece essere affrontate mediante diversi tipi di estensioni. Questo permette di gestire il dato proveniente non più da una esportazione LOD2 (come avvenuto nel caso studio), ma un LOD più avanzato in grado di gestire dati avanzati. Si ricorda che i dati energetici rappresentati nel database avvengono per mezzo di chiamate API a tabelle del database manualmente compilate. L'utilizzo di pacchetti di estensione permette di automatizzare le informazioni energetiche per effettuare le simulazioni.

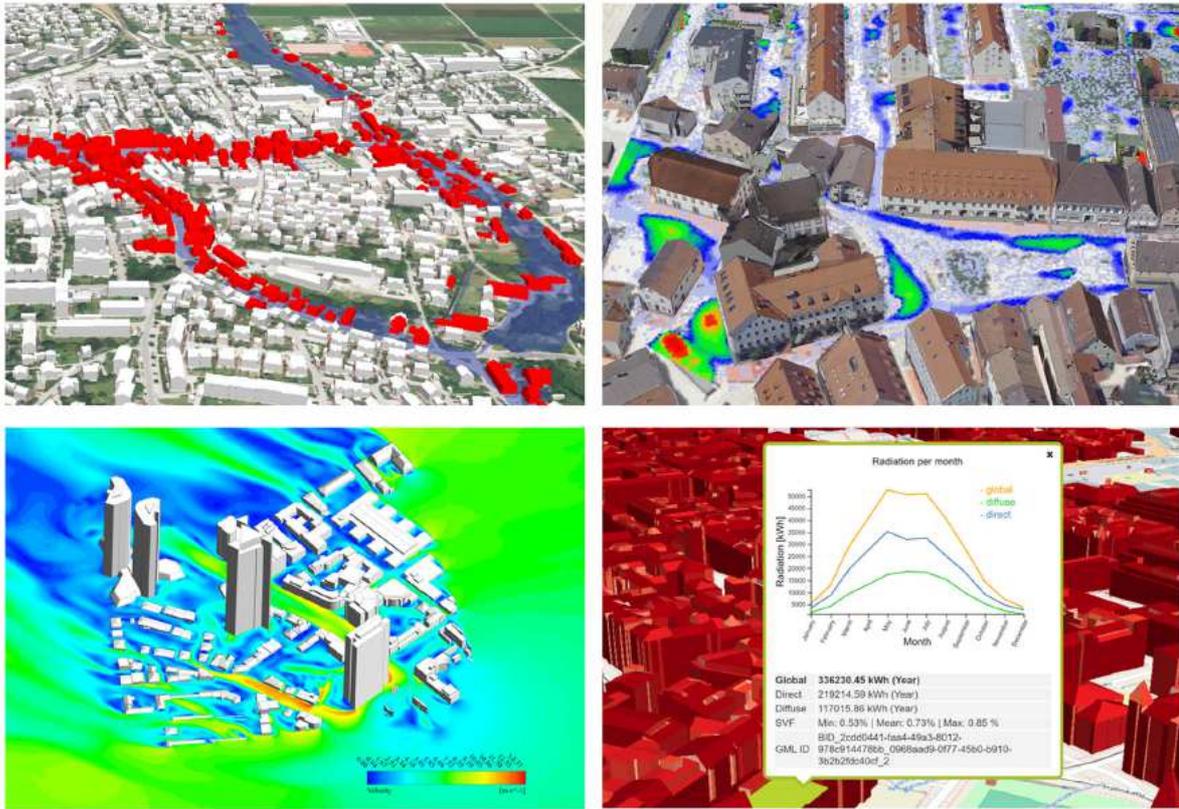


Figura 63: Futuri sviluppi : Esempio di applicazione virtualcitySUITE a partire da 3DCityDB

I gemelli digitali urbani, una volta collaudati, ci consentiranno di aprire la strada allo sviluppo urbano sostenibile a tutte le scale.

CAPITOLO 7: L'UTILIZZO DEGLI SMART ENERGY SYSTEMS NEGLI EDIFICI_IL CASO STUDIO COMPLESSO

7.1-Smart Energy Systems

Le crescenti problematiche legate alle dimensioni energetiche e ambientali hanno motivato molti ricercatori, ingegneri, progetti internazionali e nazionali a sviluppare ed integrare gli Smart Energy Systems per raggiungere un futuro più sostenibile, studiando la possibilità di progettare strategie di ristrutturazione degli impianti attraverso l'utilizzo di sistemi energetici intelligenti, altamente performanti e impiegabili per la riqualificazione del parco edilizio esistente. Attualmente, il processo di industrializzazione è fortemente dipendente dall'energia e richiede significative quantità di risorse materiali per ottenere i requisiti ambientali, di crescita economica e benessere collettivo. Inoltre, la domanda di energia negli edifici sta aumentando in modo proporzionale all'escalation globale e al miglioramento degli standard di vita della popolazione. Essendo pertanto gli edifici i principali responsabili tra i produttori di emissioni di carbonio, è fondamentale per la completa transizione energetica, ridurre l'impatto sull'ambiente abbattendo le emissioni climalteranti. La stessa commissione Europea, nella direttiva 2018/844 si sofferma sull'evoluzione in cui si trova il panorama energetico, focalizzandosi su due particolari aspetti, la digitalizzazione del sistema elettrico e la predisposizione degli edifici all'intelligenza, ovvero, lo Smart building.

....“Per digitalizzare il settore edilizio, gli obiettivi dell’Unione in materia di connettività e le sue ambizioni relative alla diffusione di reti di comunicazione ad alta capacità sono importanti per abitazioni intelligenti e per comunità dotate di buoni collegamenti. Si dovrebbero predisporre incentivi mirati per sistemi predisposti all’intelligenza e soluzioni digitali nell’ambiente edificato. Ciò offre nuove opportunità in termini di risparmio energetico, fornendo ai consumatori informazioni più precise sui loro modelli di consumo e consentendo al gestore di sistema di gestire più efficacemente la rete”....

Un sistema energetico intelligente quindi è tale perché combina e assicura contemporaneamente più aspetti fondamentali garantendo i più alti livelli di sostenibilità ed efficienza. Tali sistemi presentano vantaggi globali, integrando aspetti multidimensionali e pluridisciplinari, ottenendo i target futuri per la transizione

energetica. Alcuni dei vantaggi dei sistemi energetici intelligenti possono essere riassunti in termini di sicurezza e benessere, ma anche occupazionali, economici, produttivi, infrastrutturali e sociali. Nel dettaglio, gli obiettivi raggiungibili dagli smart energy systems per un futuro sostenibile sono proposti da Dincer [160-161] e riassunti nella figura 64.



Figura 64: Obiettivi per un futuro sostenibile

- *Migliore efficienza:* ottenibile minimizzando le perdite, agendo ad esempio sull'isolamento dell'involucro edilizio o minimizzando i rifiuti attraverso il recupero. Un altro modo per raggiungere una migliore efficienza potrebbe essere associato all'utilizzo di sistemi multi-generazione dell'energia.
- *Migliore utilizzo delle risorse:* sfruttando le fonti energetiche rinnovabili o le materie disponibili riducendo gli impatti ambientali e la dipendenza da risorse non disponibili in loco.
- *Migliore efficacia in termini di costi:* una maggiore efficienza e un migliore utilizzo delle risorse portano ad un altro aspetto importante della sostenibilità, ovvero l'efficacia in termini di costi. Riducendo perdite e sprechi, generando più prodotti dalla stessa fonte di energia e utilizzando risorse affidabili, disponibili e abbondanti; i sistemi energetici intelligenti offrono una migliore efficacia dal punto di vista economico.
- *Ambiente migliore:* riducendo le emissioni globali di CO₂ così come imposto dalle attuali direttive, con una riduzione del settore energetico e dell'industria del 30-70% degli importi del 2000 prima del 2050. Dopo il 2050, l'obiettivo è avvicinarsi a zero emissioni da tutti gli aspetti della catena energetica.
- *Migliore sicurezza energetica:* significa accesso a livello mondiale a fonti energetiche, sistemi e trasportatori moderni a prezzi ragionevoli ed efficienza dell'uso finale. Una minore dipendenza dall'import/export di energia comporta più affidabilità, flessibilità, disponibilità e accessibilità dell'approvvigionamento, tra i principali obiettivi dei sistemi energetici intelligenti.

- *Migliore progettazione e analisi:* I sistemi energetici intelligenti sono progettati per ridurre al minimo perdite/sprechi, pertanto, permettono di soddisfare più esigenze contemporaneamente.

Il processo virtuoso che passa dall'utilizzo degli smart energy system permette di contare su edifici di nuova costruzione nZEB, a fabbisogno energetico quasi zero e su una sostenibilità energetica più ampia. Per quanto riguarda il parco edilizio esistente, l'utilizzo di impianti altamente performanti riveste la soluzione più efficace per il risparmio di energia primaria, in quanto le strutture sono spesso soggette a vincoli paesaggistici limitando gli interventi di miglioramento. Ad oggi ancora, la maggior parte del sistema energetico si basa sui combustibili fossili. Entro la metà del secolo, questo cambierà radicalmente con l'elettrificazione su larga scala, guidato dalla completa diffusione delle energie rinnovabili o dall'utilizzo di combustibili alternativi. Le grandi strategie di integrazione e controllo delle FER (fonti di energia rinnovabile) sono fondamentali per l'effettiva decarbonizzazione a livello internazionale, nazionale e urbano. L'integrazione e l'utilizzo di energia pulita permette di ridurre il consumo di energia primaria sostituendo gradualmente i combustibili fossili e allo stesso tempo facilitando la sicurezza energetica. Tuttavia, l'aumento della quota di FER nei mix energetici nazionali influisce negativamente sulla rete, sia in termini di efficienza, dovuta alla gestione delle attuali centrali a combustibile fossile a carico parziale (lo stress dei cavi elettrici a causa del cambiamento nella risposta temporale), sia in termini di composizione del mix energetico (a causa dello shock sul mercato fornito dagli schemi di incentivi feed-in-tariff). In questo senso, una soluzione per bilanciare l'offerta e la domanda di elettricità nel tempo, riguarda la possibilità di immagazzinare l'elettricità per brevi o lunghi periodi. I sistemi di accumulo a lungo termine rivestono un ruolo interessante per ovviare alla variabilità della generazione di elettricità da fonti energetiche rinnovabili rivestendo una priorità di mercato per l'Unione Europea. Nella tabella 24 è riportata la produzione di energia elettrica lungo una serie temporale, distinta per fonte, riportata sulla base dei dati forniti dal gestore della rete nazionale (ENEL e TERNA). La presente tabella è un estratto del National Inventory Report 2020 del Sistema Informativo Nazionale Ambientale, in cui si descrive la comunicazione annuale italiana dell'inventario delle emissioni dei gas serra in accordo a quanto previsto nell'ambito della Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici delle Nazioni Unite (UNFCCC), del protocollo di Kyoto e del Meccanismo di Monitoraggio dei Gas Serra dell'Unione Europea [162]. Dal 2010 al 2014 si osserva un calo della produzione di elettricità da combustibili fossili in Italia, trainato sia dalla recessione economica sia dall'aumento delle fonti rinnovabili per la produzione di energia. In "altri carburanti" è inclusa una moltitudine di carburanti, come biomassa, rifiuti, biogas da residui agricoli e rifiuti e gas di sintesi provenienti da processi chimici o residui.

Tabella 24 - Produzione di energia elettrica da fonti 1990-2018 (GWh) - Fonte: TERNA

Source	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018
Idroelettrica	35,079	41,907	50,900	42,927	54,407	46,970	44,257	38,025	50,503
Termoelettrica	178,590	196,123	220,455	253,073	231,248	192,054	199,430	209,485	192,730
Combustibili fossili	32,042	24,122	26,272	43,606	39,734	43,201	35,608	32,627	28,470
Gas Naturale	39,082	46,442	97,607	149,259	152,737	110,860	126,148	140,349	128,538
Gas derivati	3,552	3,443	4,252	5,837	4,731	2,220	2,832	2,501	2,520
Prodotti petroliferi	102,718	120,783	85,878	35,846	9,908	5,620	4,127	4,083	3,289
Altri combustibili	1,196	1,333	6,446	18,525	24,138	30,151	30,715	29,924	29,914
Geotermico	3,222	3,436	4,705	5,325	5,376	6,185	6,289	6,201	6,105
Eolico e fotovoltaico	0	14	569	2.347	11.032	37.786	39.793	42.120	40.370
Total	216,891	241,480	276,629	303,672	302,062	282,994	289,769	295,830	289,709

Più in generale, la quota del consumo totale di energia da fonti primarie nel periodo 1990-2018, riportata nella Tabella 25 [162], mostra un evidente cambiamento da prodotti petroliferi e combustibili solidi a gas naturale e rinnovabile mentre la percentuale di consumo di elettricità è variabile e guidata dal mercato.

Tabella 25 - Consumi energetici totali per fonte primaria 1990-2018 (%) - Source: Ministero dello sviluppo economico

Risorsa	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018
Rinnovabile	0.7	0.9	1.1	2.0	4.3	7.6	7.5	7.7	7.4
Combustibile fossile	9.6	7.9	6.9	8.6	8.0	7.7	7.0	6.1	5.4
Gas Naturale	23.7	25.7	31.4	36.0	36.2	32.6	34.6	36.3	34.7
Petrolio	56.2	54.9	49.5	43.1	38.5	34.6	34.4	34.0	34.7

Elettricità	9.8	10.5	11.1	10.3	13.1	17.6	16.5	15.9	17.8
-------------	-----	------	------	------	------	------	------	------	------

La trasformazione dai tradizionali sistemi energetici a sistemi intelligenti è osservata in numerose ricerche e studi sperimentali su piccola e media scala nel settore energetico. L'obiettivo primario degli studi è di contribuire a una migliore comprensione di come disaccoppiare la crescita economica dal degrado ambientale, attraverso l'utilizzo degli Smart Energy Systems. Gli studi sperimentali consistono principalmente in miglioramenti tecnologici nella produzione e nell'uso finale richiedendo la riconfigurazione del modello di business e adeguamenti industriali dei sistemi energetici attuali. Le ricerche si concentrano anche su innovazioni tecnologiche che possono cambiare le interazioni tra fornitori di energia e consumatori, cambiando i ruoli dei giocatori nel campo dei sistemi energetici. Ad esempio, il surplus di energia prodotto dal consumatore potrebbe essere riversato nella rete nazionale diventando a sua volta una fornitura di energia per altri utenti. Al fine di fornire una base per le invenzioni che conducono ai sistemi di energia intelligente, è importante sostenere con successo le caratteristiche tecnologiche. A riguardo, il progetto PRIN2015 ha svolto e pubblicato numerose ricerche per il loro impiego da cui ne deriva un inquinamento ambientale quasi nullo. L'odierna analisi energetica non può quindi essere orientata soltanto al costante miglioramento del rendimento dei processi (in termini di simulazioni termodinamiche), ma deve tenere conto soprattutto dell'individuazione di cicli che non consumino risorse non ripristinabili ed assicurino anche un impatto praticamente nullo sull'ecosistema. In questa prospettiva, alcune ricerche del PRIN sono state orientate alle opportunità di adozione dell'idrogeno come nuovo vettore energetico per offrire possibile contributo allo sviluppo sostenibile. L'obiettivo è sempre quello di integrazione e combinazione di diversi sistemi e fonti energetiche per raggiungere una migliore efficacia in termini di costi, risorse e ambiente. Più diffusi sono l'utilizzo di sistemi basati su CHP (Combined Heat and Power) e l'uso delle pompe di calore recentemente considerate una potenziale opzione per bilanciare le fonti rinnovabili. Le pompe di calore, siano esse elettriche o a gas, ad aria o ad acqua, sono, tra le tecnologie per la produzione del calore per il riscaldamento più promettenti ed efficienti disponibili oggi sul mercato. Negli ultimi anni, queste apparecchiature hanno subito un notevole sviluppo tecnologico e prestazionale, grazie anche alla loro capacità di estrarre buona parte di energia dall'ambiente (energia rinnovabile). Il progetto PRIN2015 ha studiato e analizzato differenti opzioni tecnologiche e operative quali la diversità di combustibili o gas refrigeranti impiegati per l'utilizzo delle pompe di calore (vedi idrogeno-metano o anidride carbonica).

Avendo tenuto conto di tali tecnologie, il lavoro si propone di identificare algoritmi per la generazione e la gestione dell'energia investigando e creando sistemi edificio-

impianti, modellati in ambiente MATLAB-Simulink. Inoltre, vengono utilizzate le simulazioni dinamiche di ausilio per la caratterizzazione di diversi scenari, realizzati attraverso l'uso di controlli automatici e iterativi per diversi indicatori, quali ad esempio i consumi di energia primaria. Tra le varie tecnologie studiate viene riportato il caso studio della risposta di una pompa di calore a CO₂ trans-critica con gas refrigerante R744. Nel dettaglio le pompe di calore sono state adottate su 4 villette unifamiliari posizionate all'interno di un singolo lotto, oltre all'utilizzo di pannelli fotovoltaici per le abitazioni esposte a sud, il sistema è costituito da una caldaia tradizionale e un cogeneratore per la produzione di acqua calda sanitaria ed elettricità a sostegno delle pompe di calore. Tale layout è stato confrontato con quello tradizionale basato su sistemi di generazione separati sulla base di diversi indicatori di prestazione energetica. Inoltre, è stata effettuata un'analisi di sensibilità sul risparmio di energia primaria, sui consumi di energia fossile primaria e sulla frazione di energia rinnovabile.

7.2-Caso Studio 5: Dynamic Simulation Model of Trans-Critical Carbon Dioxide Heat Pump Application for Boosting Low Temperature Distribution Networks in Dwellings

Il presente capitolo affronta la descrizione dettagliata del caso studio complesso, che vede l'utilizzo di sistemi energetici avanzati intelligenti. Viene quindi riportata di seguito la nomenclatura utilizzata:

C _p	Specific heat (J/kg K)
D	Diameter (mm)
E	Energy (kWh)
G	Flow (l/h)
h	Enthalpy (kJ/kg)
L _h	Latent heat
\dot{m}	Mass flow rate (kg/s)
P	Pressure (bar)
Q	Heat load (kW)
r	Distributed load loss (mmH ₂ O)
ρ	Density (kg/m ³)
T	Temperature (°C)
v	Speed (m/s)
W	Compressor work
x	Localized loss coefficient

η	Efficiency
λ	Thermal conductivity [W/m ² K]
ν	Viscosity (m ² /s)
Subscripts	
com	Compressor
des	Design
e	Electrical
ev	Evaporator
gc	Gas cooler
in	Inlet
is	Isentropic
out	Outlet
reg	Regeneration
sub	Sub cooling
t	Thermal
w	Water
Abbreviations	
CHP	Combined heat and power
CO ₂	Carbon dioxide
COP	Coefficient of performance
DHW	Domestic hot water
fRES	Renewable energy fraction
GHG	Greenhouse gas
GWP	Global warming potential
HP	Heat pump
IHEX	Internal heat exchanger
nZEB	Nearly zero emission buildings
ODP	Ozone Depletion Potential
PEC	Primary energy consumption
PES	Primary energy saving
PTHR	Power to heat ratio
PV	Photovoltaic panels
RES	Renewable energy sources

La ricerca indaga il ruolo delle nuove applicazioni dei sistemi di energia ibrida per lo sviluppo di una nuova strategia di rinnovamento degli impianti per implementare sistemi di energia intelligenti su piccola scala. Il lavoro è stato svolto nel 2018 e ha visto la sua pubblicazione sulla rivista *Energies* nel 2019 [126-163]. Nel dettaglio, si occupa di simulare dinamicamente l'applicazione di una pompa di calore a CO₂ transcritica per potenziare le reti di distribuzione a bassa temperatura e per creare un sistema di condivisione del calore per le abitazioni. Il caso studio vede l'utilizzo di quattro pompe di calore trans-critiche ad anidride carbonica (CO₂-HP), pannelli fotovoltaici termici, combinati ad un sistema di cogenerazione (CHP) per la produzione di acqua calda sanitaria. Inoltre, per il suddetto sistema, è stata valutata l'adozione dei dispositivi di accumulo elettrici. Il layout è stato confrontato con quello tradizionale basato su sistemi di generazione separati utilizzando diversi indicatori di prestazione energetica. Inoltre, è stata effettuata un'analisi di sensitività sul risparmio di energia primaria, sui consumi di energia fossile primaria, sulla frazione di energia rinnovabile e sull calore rinnovabile, con cambiamenti nel rapporto potenza/riscaldamento dell'edificio. I risultati ottenuti hanno evidenziato che utilizzando il sistema ibrido è possibile ottenere un risparmio del 50% circa. Di conseguenza, l'adozione di pompe di calore a CO₂ transcritica e di sistemi ibridi potrebbe essere un'opzione praticabile per conseguire la qualifica nZEB.

7.2.1-Introduzione

Oggigiorno, l'uso consapevole delle risorse energetiche costituisce un'importante questione di dibattito politico, grazie anche alle direttive emanate dell'Unione Europea. In particolare, l'inquinamento atmosferico, le emissioni di gas serra (GHG), le relative variazioni climatiche e la crescente frequenza delle catastrofi ambientali stanno rendendo necessarie nuove misure preventive e di recupero. Come precedentemente affrontato, una grande sfida riguarda l'aumento dell'efficienza energetica degli edifici esistenti, indagando le migliori misure al fine di abbinare gli obiettivi normativi restrittivi e le limitazioni architettoniche [164]. In questo contesto, sono in corso numerosi studi per trovare soluzioni innovative di ingegneria impiantistica a livello tecnologico, basate sullo studio di materiali efficienti [165] e sui più recenti sistemi di generazione di energia [166-168]. Secondo quanto riportato in letteratura, il periodo di ammortamento per questo tipo di interventi è di circa 25-30 anni [169,170]. L'integrazione delle energie rinnovabili nei sistemi energetici non è sempre possibile a causa di vincoli paesaggistici o urbani [171,172] anche se l'impianto è tecnicamente fattibile. Per questo motivo, una soluzione alternativa potrebbe essere l'implementazione di nuovi impianti e tecnologie di riscaldamento e di elettricità [173]. Il caso studio affrontato mira a mediare tra il ruolo potenziale dei sistemi di energia ibrida e il concetto di condivisione del riscaldamento [174,175]. Inoltre, focalizzando l'attenzione della ricerca solo sull'efficienza della generazione di energia, è stata studiata la possibilità di progettare una nuova strategia di ristrutturazione degli impianti al fine di promuovere l'uso di sistemi energetici

intelligenti su piccola scala. Di conseguenza, tale approccio può contribuire positivamente al conseguimento della qualifica NZEB grazie alla riduzione delle emissioni di CO₂ nel corso del processo di consumo [176-178]. Per tale motivo, l'adozione di un sistema di energia ibrida in grado di combinare combustibili fossili con fonti di energia rinnovabile [179-181] può essere considerata una valida soluzione per il risparmio di energia primaria negli edifici esistenti. È degno di nota il modo in cui i sistemi ibridi basati su CHP e pompe di calore sono stati recentemente considerati in letteratura, come una potenziale opzione per bilanciare l'intermittenza delle fonti rinnovabili, specialmente in tutti quei luoghi in cui sono state sviluppate grandi reti di teleriscaldamento [182]. Avendo tenuto conto di tali tecnologie, è stata proposta la sinergia tra i dispositivi di produzione di riscaldamento ad alta e bassa temperatura e le energie rinnovabili elettriche. In tal modo, è stata concettualizzata una prevedibile modifica nel funzionamento comune delle pompe di calore a CO₂ trans-critica in modo da potenziare la rete di distribuzione a bassa temperatura per le abitazioni. La tipologia di pompe di calore è stata inoltre investigata da diversi autori soprattutto nel campo della refrigerazione [183-191]. Le applicazioni tipiche consistono nella generazione contemporanea di caldo e freddo o per il condizionamento dell'aria. Alcuni autori hanno inoltre proposto di modificare alcuni parametri operativi della pompa al fine di aumentare la temperatura di evaporazione per i cicli transcritici [192]. La ricerca mostra come è possibile condividere il calore per un piccolo gruppo di edifici attraverso l'uso di un innovativo sistema di energia ibrida confrontando i risultati con il tradizionale sistema di produzione di energia, individuando altresì vantaggi e svantaggi.

7.2.2-Metodologia

Sebbene i pannelli solari, i cogeneratori (CHP) e le pompe di calore siano considerati alcune delle soluzioni energetiche più efficienti [193], i più grandi apparecchi adottati per il riscaldamento nei paesi come l'Italia, sono caldaie a (GN) gas naturale. Il tipico sistema di generazione separata è stato confrontato con la nuova opzione basata sull'impianto ibrido per la generazione di elettricità e calore ad alta temperatura (ovvero, per una temperatura di approvvigionamento idrico pari a 65 °C o 70 °C). Il layout di riferimento del caso studio consiste in un gruppo di quattro edifici, in cui la centrale elettrica è una combinazione di una pompa di calore ad aria (35 kWt), un micro CHP (6 kWe – 10 kWt), quattro pompe di calore elettriche a CO₂ trans-critiche (CO₂-HPs di 12,5 kW) e pannelli fotovoltaici termici (7 kW). La superficie utilizzabile è di circa 170 m² per ogni edificio disposta su due piani. La rete di distribuzione è stata progettata in una posizione centrale rispetto alle residenze, al fine di ridurre le perdite di calore e migliorare le sue prestazioni. Inoltre, due edifici sono stati dotati di pannelli fotovoltaici integrati sul tetto. E' stata installata una pompa di calore tradizionale per fornire e distribuire acqua calda a bassa temperatura a circa 35 °C. Ciononostante, la pompa di

calore ad aria potrebbe essere sostituita con una di origine geotermica, una pompa di calore ad acqua di mare o altre pompe di calore a bassa temperatura, a seconda della posizione e della disponibilità della fonte locale. Ciò garantisce l'interconnessione dei quattro edifici mediante un circuito idraulico in una rete di riscaldamento su piccola scala. Il CHP può fornire acqua calda sanitaria (ACS) 24 ore al giorno. Yang et al. [194] ha implementato con successo un modello trans-critico di pompa di calore a CO₂ che mostra come migliorare le prestazioni del sistema diminuendo la temperatura della rete di distribuzione all'interno delle tubazioni e aumentando la portata massica dell'acqua di raffreddamento ottenendo il COP massimo. La ricerca attuale si concentra principalmente sull'implementazione di un sistema energetico intelligente basato sull'impiego di pompe di calore a CO₂ trans-critiche, come riportato nella figura 65.

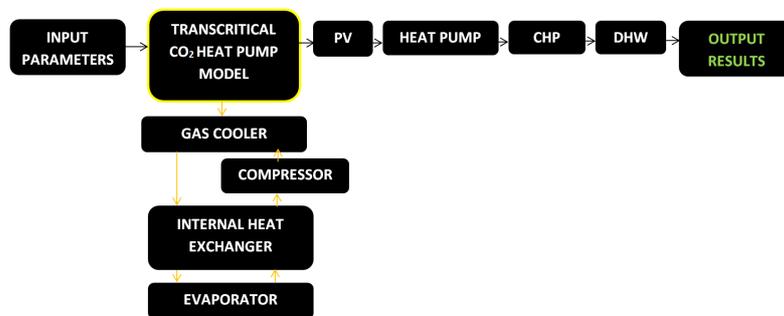


Figura 65: Flusso di lavoro per il modello energetico in MATLAB

La prima parte del lavoro è stata pertanto incentrata sulla ricerca bibliografica per la pompa di calore, a seguire, la creazione di modelli matematici adeguati. I sistemi energetici intelligenti sono integrati con più settori (elettricità, riscaldamento, raffreddamento, industria, edifici e trasporti), consentendo l'identificazione di soluzioni più idonee per rendere possibile la trasformazione in un sistema energetico rinnovabile e sostenibile [195].

Descrizione del sistema di edifici

Il progetto è costituito da un complesso residenziale di quattro edifici disposti in un unico lotto, in modo simmetrico ed equidistante nelle due direzioni. Il sistema impianto investigato, è posizionato centralmente fornendo una distribuzione del fluido in modo proporzionato, e in modo da ridurre al minimo le perdite di calore. Il lotto esaminato è riportato nella figura 66.

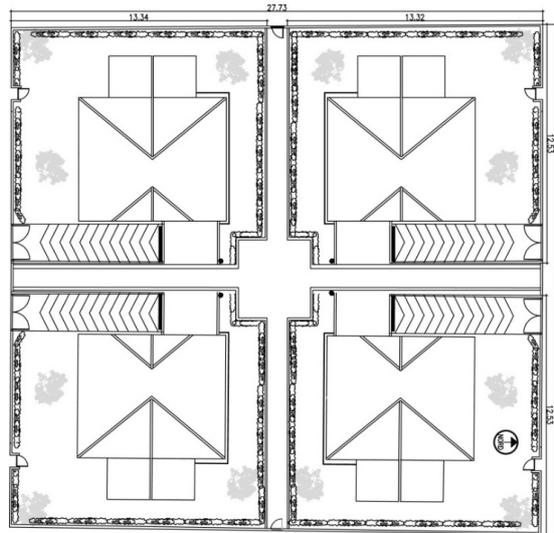
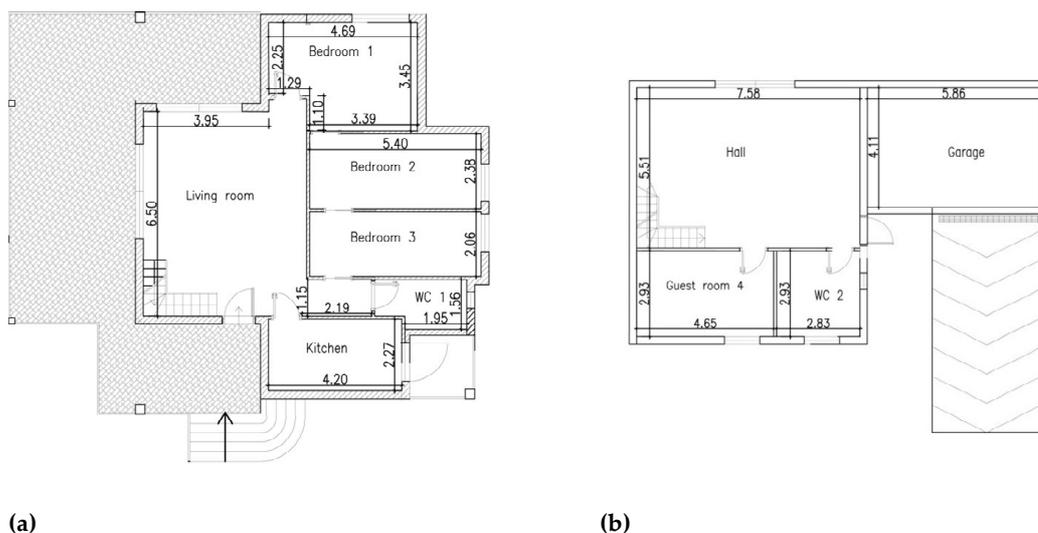


Figura 66: Pianta del lotto residenziale

Ogni edificio è composto da due livelli (piano terra e piano seminterrato) ed è caratterizzato da un'area calpestabile di circa 170 m². Il seminterrato comprende una camera per gli ospiti, un bagno, la hall e un garage esterno. La scala interna conduce al piano superiore dove si trovano le camere da letto matrimoniali, la cucina e il bagno. La figura 67 mostra rispettivamente il piano terra e il layout del seminterrato per ciascun edificio, mentre i dati geometrici della struttura sono riportati nella tabella 26. I carichi termici sono stati calcolati secondo le procedure della legge italiana 10/91 con il software certificato del Comitato Tecnico Termico Italiano (CTI), un'entità federata con UNI. Questi strumenti di calcolo devono garantire che i valori dell'indice di prestazione energetica abbiano una deviazione massima del 5% rispetto ai parametri stabiliti. La tabella 27 riassume i dati geometrici per l'analisi energetica del piano terra e del seminterrato.



(a)

(b)

Figura 67: Livelli dell'edificio: (a) pianta piano terra e (b) pianta piano interrato

Tabella 26 - Dati geometrici dei locali interni

Livello	Spazi	Descrizione	A [m ²]	H [m]	Vn [m ³]
Piano Terra	1	Soggiorno	36.26	3.30	119.66
Piano Terra	2	Camera 1	14.69	3.30	48.48
Piano Terra	3	Camera 2	12.83	3.30	42.34
Piano Terra	4	Camera 3	11.13	3.30	36.73
Piano Terra	5	WC 1	4.14	3.30	13.66
Piano Terra	6	Cucina	9.53	3.30	31.45
Piano Terra		Total	88.58		292.31
Interrato	7	Atrio	41.72	2.50	104.30
Interrato	8	Garage	24.08	2.50	60.20
Interrato	9	Camera Ospiti 4	13.65	2.50	34.13
Interrato	10	WC 2	8.30	2.50	20.75
Interrato		Total	87.75		219.37
		Totale complessivo	176.33		511.68

Tabella 27 - Superfici e volumi

	Piano Terra	Seminterrato
Area Superficie Esterna (S) - m ²	238.63	193.33
Volume Lordo Riscaldato (V) - m ³	369.86	288.05
Rapporto forma/volume (S/V) - m ² / m ³	0.65	0.67
Superficie netta riscaldata - m ²	88.58	87.75
Volume netto riscaldata - m ³	292.31	219.37

Analisi con Matlab Simulink

Tutti i componenti del sistema ibrido sono stati implementati e simulati in MATLAB SIMULINK (versione R2018) ed ogni scenario energetico è stato analizzato sulla base di quattro diversi indicatori energetici: consumo di energia primaria (PEC), risparmio di

energia primaria (PES), frazione di energia rinnovabile (fRES) e calore rinnovabile consegnato all'utente finale. Infine, è stata eseguita un'analisi di sensibilità che varia i valori del rapporto potenza/calore dell'edificio (vedi Equazione (20)), da 0,1 a 0,8. Assemblando ogni modello matematico semplificato correlato ai generatori di energia (ovvero la tradizionale pompa di calore, la pompa di calore elettrica a CO₂ transcritica, la cogenerazione e il fotovoltaico) insieme ai conseguenti fabbisogni energetici dell'edificio, sono state determinate le prestazioni energetiche del sistema ibrido ed infine discusse. L'analisi di sensibilità ha permesso di valutare in che modo gli indicatori di prestazione energetica sono influenzati dalle condizioni al contorno quando questi variano in +/- 15%.

Modellistica matematica

Il layout innovativo del sistema associato al sistema di energia ibrida è costituito da quattro pompe di calore elettriche a CO₂ transcritica, per produrre acqua calda ad alta temperatura che alimenta i tradizionali sistemi di riscaldamento dell'edificio: una pompa di calore ad aria è stata collegata al fine di tenere sotto controllo la differenza di temperatura al pozzo caldo-freddo; infine, un micro CHP è stato integrato al fine di fornire acqua calda sanitaria ed elettricità per le pompe di calore oltre ai fotovoltaici, come mostrato nella figura 68.

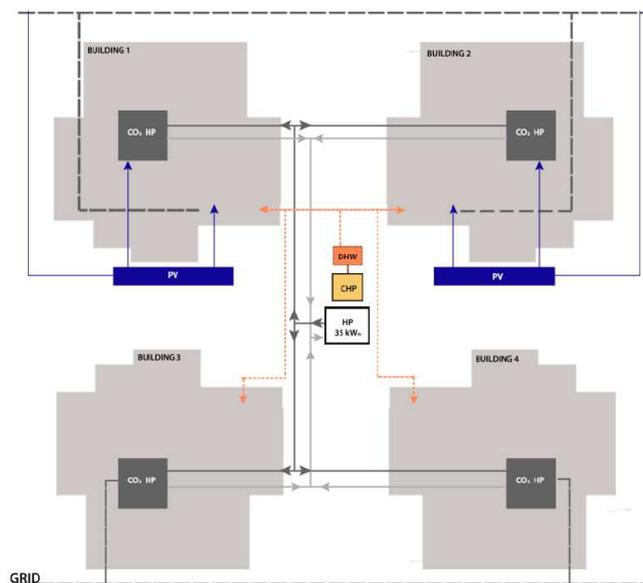


Figura 68: Layout del sistema ibrido di energia

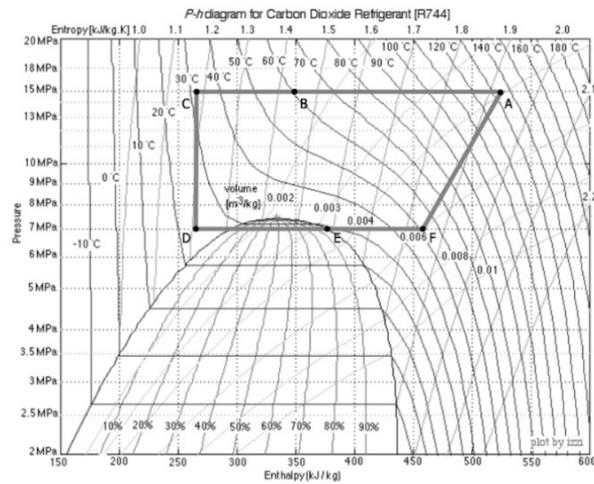
Per le proprietà fisiche dell'anidride carbonica, il coefficiente di prestazione delle pompe a CO₂ può raggiungere valori elevati grazie alle sue buone proprietà di trasmissione del calore e alla possibilità di utilizzare piccoli compressori [196]. In ogni caso, la presente

analisi non considera l'impronta di riscaldamento globale della pompa di calore, a seconda della perdita di refrigerante nell'ambiente, e l'impronta di energia elettrica o vapore utilizzata per il compressore. Ciò è dovuto al fatto che l'obiettivo del progetto è valutare il risparmio energetico ottenibile dall'adozione di una centrale energetica ibrida. Detto questo, vale la pena notare che ci sono tre fattori principali che richiedono particolare attenzione quando la CO₂ viene utilizzata come fluido di lavoro [197–199]: la prima riguarda l'alta pressione di esercizio, superiore a 73,75 bar; la seconda è la bassa temperatura critica poiché l'anidride carbonica raggiunge il suo punto critico ad una temperatura di 31 °C; infine, si deve considerare che i refrigeranti potrebbero fuoriuscire e necessitare di essere ricaricati, in questo caso la CO₂ molto spesso deriva da fonti fossili. Pertanto, rispetto ad altri refrigeranti, l'anidride carbonica richiede un sistema attentamente progettato per far fronte alle sue peculiari caratteristiche di temperatura e pressione. I costi di produzione e distribuzione dei sistemi di CO₂ sono relativamente bassi rispetto ad altri refrigeranti, poiché il suo uso non è soggetto a brevetti e di conseguenza non è limitato; inoltre, è una sostanza non tossica e non infiammabile, che ne rende sicuro l'uso. I cicli di CO₂ devono essere attentamente studiati perché, date le sue caratteristiche, non sono assimilati ai cicli tradizionali. Sebbene gli esperimenti sopra citati siano utili e forniscano dati preziosi, i tempi di valutazione e i costi di strumentazione rappresentano un ostacolo sempre presente alla ricerca, pertanto in questo caso, sono stati utilizzati approcci più immediati basati su simulazioni numeriche [197,198]. Utilizzando le analisi termodinamiche e lo studio delle caratteristiche di trasporto del refrigerante e del fluido secondario, è stato possibile modellare matematicamente tutti i componenti. Il modello semplificato di CO₂ è stato costruito all'interno dell'ambiente MATLAB (R2018) implementando l'equazione del bilancio energetico relativa ai seguenti cinque componenti: compressore del vapore, radiatore del gas, evaporatore, valvola di espansione e scambiatore di calore interno. Come si può vedere sia nel diagramma di entalpia (figura 69) che nella Tabella 28, la pressione di progetto raggiunge 150 bar all'interno del refrigeratore di gas e 70 bar all'interno dell'evaporatore, con un rapporto di compressione calcolato (p_2 / p_1) pari a 2.143. La temperatura del gas scende da 134,2 °C a 60,85 °C nel refrigeratore, quindi da 60,85 °C a 33,67 °C nello scambiatore di calore interno e raggiunge un valore di 28,67 °C nell'evaporatore.

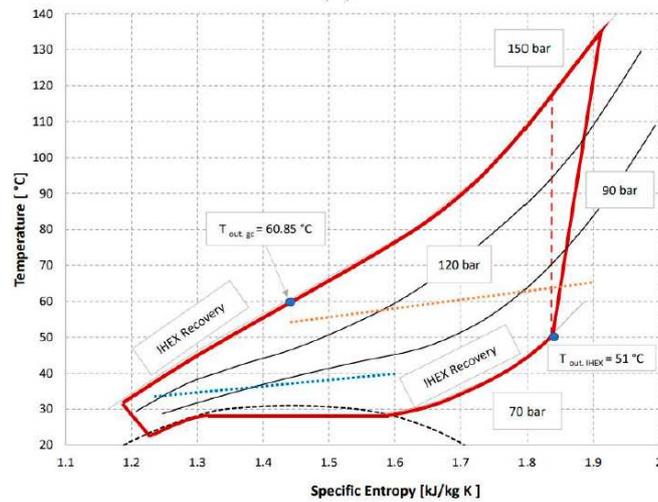
Tabella 28 - Parametri della pompa a CO₂ transcritica.

Componenti	Parametri CO ₂		Parametri Acqua	
Refrigeratore	T = 134.2 [°C]	P = 15 [MPa]	55 °C Ingresso	65 °C Uscita
Scambiatore Interno	T = 33.67 [°C]	P = 15 [MPa]	-	-

	$T = 28.67 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$P = 7 \text{ [MPa]}$		
Evaporatore	$T = 28.67 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$P = 7 \text{ [MPa]}$	40 °C Ingresso	35 °C Uscita
Compressore	$T = 51 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$P = 7 \text{ [MPa]}$	-	-
		$P = 15 \text{ [MPa]}$		



(a)



(b)

Figura 69: (a) Diagramma P-h del refrigerante [R744] e (b) diagramma T-S (A: Ingresso refrigeratore; B: Ingresso scambiatore; C: valvola; D: Ingresso evaporatore; E: Ingresso scambiatore; F: Ingresso compressore).

L'efficienza delle pompe di calore è misurata dal coefficiente di prestazione (COP) dato dal rapporto tra l'energia utile (calore trasferito nell'ambiente da riscaldare) e

l'elettricità consumata. Il COP della pompa di calore a CO₂ è di circa 3,6 ed è influenzato da differenti variabili operative, come la temperatura di uscita dell'acqua refrigerata o la temperatura di uscita dell'anidride carbonica dal refrigeratore.

Bilancio energetico HP trans-critico CO₂

Per prima cosa è stata ipotizzata la differenza di temperatura iniziale, nella figura 70 è riportato lo schema generale del sistema considerato, dotato di compressore, evaporatore, scambiatore interno e refrigeratore.

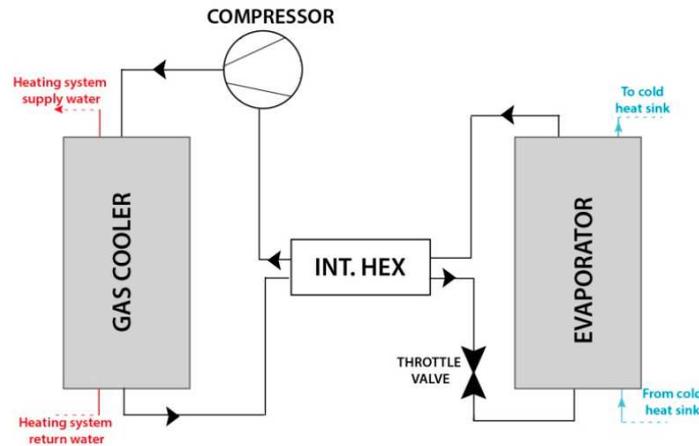


Figura 70: Layout interno della pompa di calore.

Refrigeratore

Progettare un refrigeratore in un sistema a CO₂ è piuttosto difficile a causa delle sue differenze con il condensatore tradizionale. La pressione di esercizio massima è di 150 bar e la temperatura di esercizio è limitata a 134.2 °C. Un altro problema che può essere riscontrato in un sistema a CO₂ è l'elevata influenza della temperatura di uscita del refrigeratore sull'efficienza del sistema (COP). Infatti, secondo Sarkar et al. [200] all'aumentare di tale temperatura, la pressione di scarico deve essere migliorata. Tuttavia, tale miglioramento penalizza fortemente il coefficiente di prestazione della pompa a causa della maggiore potenza meccanica richiesta dal compressore. Per ovviare a tale inconveniente è stata aumentata la temperatura di evaporazione al fine di recuperare la cascata termica a bassa temperatura. Le equazioni termodinamiche utilizzate sono mostrate di seguito:

$$T_{out} + DT_{des} = T_{in,gc} \quad (1)$$

$$T_{in} + DT_{des} = T_{out,gc} \quad (2)$$

$$h_{in,gc} - h_{out,gc} = Dh_{gc} \quad (3)$$

$$\frac{\text{Build.Load}}{\Delta h_{gc}} = \dot{m}_{CO_2} \quad (4)$$

Compressore

Il refrigerante CO₂ naturale offre due caratteristiche: l'alta pressione di esercizio e la pressione differenziale; questi livelli di pressione sono fino a 10 volte superiori rispetto ai refrigeranti HFC. Durante lo sviluppo di compressori di CO₂ sono stati considerati due fattori: l'elevata efficienza e la resistenza all'alta pressione di esercizio, a causa della differenza di pressione che va da 70 a 150 bar nel sistema di CO₂ trans-critico esaminato. Le equazioni termodinamiche utilizzate sono mostrate di seguito:

$$h_{out,comp} - h_{in,com} = Dh_{com} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta h_{com}}{\eta_{is}} = \Delta h_{com,real} = W \quad (6)$$

$$P_{CO_2} = W \cdot \dot{m}_{CO_2} \quad (7)$$

$$P_{el,com} = \frac{P_{CO_2}}{\eta_{el/mec}} \quad (8)$$

Evaporatore

Le equazioni del bilancio energetico per l'evaporatore e lo scambiatore di calore interno sono le seguenti:

$$Q_{ev} = Dh_{ev} \cdot \dot{m}_{CO_2} \quad (9)$$

$$\dot{m}_w = \frac{Q_{ev}}{C_{ph20} (T_{in,w} - T_{out,w})} \quad (10)$$

$$L_h + Dh_{sub} = Dh_{ev} \quad (11)$$

Scambiatore di calore interno

$$h(T_{reg}) - h(T_{ev}) = Dh_{reg} \quad (12)$$

$$Q_{IHEX} = Dh_{reg} \cdot \dot{m}_{CO_2} \quad (13)$$

$$Dh_{reg} + h_{out,IHEX} = h_{out,gc} \quad (14)$$

$$T_{ev,CO_2} + DT_{cold,reg} = T_{out,IHEX} \quad (15)$$

Modelli di cogenerazione e caldaie

Il motore a combustione interna è stato considerato la tecnologia di riferimento per le applicazioni di cogenerazione. Il modello energetico del componente si basa sulle relazioni fondamentali della prima legge della termodinamica. In particolare, una volta fissate le dimensioni elettriche della cogenerazione, l'efficienza elettrica e l'efficienza di recupero del calore del motore, è possibile calcolare la potenza termica e i consumi di carburante. Inoltre, sempre con MATLAB, è stato possibile implementare la curva di efficienza elettrica tipica per piccoli CHP. In tal modo, è possibile valutare tutte le uscite di energia quando il CHP funziona in condizioni di carico parziale. Detto questo, la strategia di controllo della cogenerazione per la produzione di acqua calda sanitaria è il cosiddetto monitoraggio termico. In dettaglio, mantenendo sotto controllo la temperatura dell'acqua calda, l'unità di controllo riduce la velocità di rotazione del motore, in questo modo è possibile modulare sia l'energia elettrica che quella termica. Per fare ciò in MATLAB è stato implementato un controller lineare, lo stesso approccio è stato utilizzato per la caldaia convenzionale. Per quanto riguarda i valori di efficienza di recupero elettrico e termico della cogenerazione, sono stati assunti pari a 0,29 e 0,51, rispettivamente, alla potenza nominale. D'altra parte, l'efficienza termica della caldaia convenzionale è stata fissata a 0,85.

Equazioni di bilancio

Come accennato in precedenza, il nuovo design dell'impianto consente alle quattro pompe di calore dell'edificio di condividere un dissipatore di calore freddo (35–40 °C) in cui il calore di bassa qualità è prodotto dai tradizionali HP caratterizzati da un SCOP (COP stagionale) pari a 3,5. In tal modo, le pompe a CO₂ sono guidate dal dissipatore di calore condiviso e l'elettricità è alimentata dai pannelli fotovoltaici e dal cogeneratore. In particolare, i due edifici a sud sono dotati di pannelli fotovoltaici per una potenza di picco complessiva di 7 kW e il CHP è in grado di fornire acqua calda sanitaria con l'impiego di accumulo termico caldo. Le seguenti equazioni di bilancio sono state considerate per analizzare il primo sistema:

Bilancio elettrico:

$$E_{el,Build} + E_{el,HP} = E_{el,CHP} + E_{el,PV} + E_{el,Grid} + E_{el,Excess} \quad (16)$$

Bilancio termico:

$$E_{H,Build} + E_{DHW} = E_{H,HPCO2} + E_{DHW,CHP} \quad (17)$$

Facendo riferimento all'equazione (16), l'energia elettrica $E_{el,HP}$ include il fabbisogno energetico per guidare sia la fonte di aria che le pompe di calore trascritiche ad anidride carbonica. Secondo il concetto nZEB, tutti i componenti dei sistemi ibridi dovrebbero essere studiati sulla base di quattro principi come il consumo di energia primaria (PEC), il risparmio di energia primaria (PES), la frazione di energia rinnovabile (fRES) e il calore rinnovabile fornito agli utenti finali. Poiché il PTHR (Power to heat ratio) è un parametro di ruolo chiave in termini di definizione del processo di dimensionamento, l'analisi della sensibilità è stata realizzata variando tale valore in un ampio intervallo (0,1-0,8). Il PES è il risultato della differenza tra il PEC per il sistema di riferimento e l'energia consumata dal sistema ibrido. Questi valori sono stimati come segue:

$$PEC = E_{fuel,CHP} + E_{fuel,Grid} \quad (18)$$

$$f_{RES} = \frac{E_{pv} + E_{Hp}}{E_{H,Build.} + E_{el,HP} + E_{DHW}} \quad (19)$$

$$PTHR = \frac{E_{el,Build.}}{E_{H,Build.} + E_{DHW,Build.}} \quad (20)$$

La ricerca analizza inoltre un sistema tradizionale che impiega una caldaia per la produzione di calore e acqua calda sanitaria. Le equazioni correlate sono mostrate di seguito.

$$E_{EL,BUILD} = E_{EL,GRID} \quad (21)$$

$$E_{H,BUILD} = E_{H,BOILER} + E_{H,BOILERDHW} \quad (22)$$

Una volta che i valori di riferimento sono stati calcolati, sono stati valutati anche gli indicatori di prestazione relativi al sistema ibrido e quindi confrontati. Infine, gli scenari di base sono stati confrontati tra loro.

Perdite di calore della rete

Un fluido che fluisce attraverso un tubo provoca perdite di carico (ad es. Cadute di pressione dovute all'attrito interno tra lo strato interno del tubo e il fluido). Le perdite di carico sono a loro volta divise in due categorie: distribuite e concentrate. Il primo caso vede delle perdite distribuite ovunque nei tubi, mentre le perdite di carico concentrate si trovano in un punto definito e sono dovute a ostacoli come un rubinetto, un ramo, un gomito. Le equazioni utilizzate per il calcolo delle perdite di carico delle reti sono elencate di seguito:

$$\text{Velocità [m/s]} \quad v = 0.278 \frac{4G}{\pi D^2} \quad (23)$$

$$\text{Densità [kg/m}^3] \quad r = 1000.18576 + 0.007136t - 0.005718 t^2 + 0.00001468 t^3 \quad (24)$$

$$\text{Viscosità [m}^2/\text{s]} \quad v = (1.67952 - 0.042328 \cdot t + 0.000499 \cdot t^2 - 0.00000214 \cdot t^3) \cdot 10^6 \quad (25)$$

$$\text{Perdite di carico distribuite [mmH}_2\text{O]} \quad r = 14.70v^{0.25} \cdot \rho \frac{G^{1.75}}{D^{4.75}} \quad (26)$$

$$\text{Perdite di carico concentrate [mmH}_2\text{O]} \quad z = xr \frac{v^2}{2 \cdot 9.81} \quad (27)$$

G = flusso [L/h]

D = diametro [mm]

Il fattore x dipende dalla forma di perdita localizzata e può essere determinato con formule appropriate o con test di laboratorio. Per quanto riguarda le perdite di calore insieme alla rete di distribuzione, sono fortemente dipendenti dalla temperatura media di esercizio, dai materiali dei tubi, nonché dai materiali isolanti e dal loro spessore. Com'è noto, minore è la temperatura di esercizio, minori sono le perdite di energia. Per tale motivo, l'obiettivo aggiuntivo di questo studio è valutare i potenziali benefici associati all'adozione del nuovo impianto. Per eseguire simulazioni, tutti i tubi di alimentazione e di ritorno sono stati considerati interrati (figura 71). Di conseguenza, è stato utilizzato un modello di calcolo dedicato secondo le equazioni (28) - (34). Poiché la rete di distribuzione non è estesa, è stato ipotizzato lo stesso diametro sia per i tubi di alimentazione che per quelli di ritorno. Alla fine, le dispersioni totali di entrambi i layout degli impianti sono state calcolate e confrontate tra loro.

$$R_{\text{pipe}} = \frac{1}{\alpha_i \pi d_i} + \frac{1}{2 \pi \lambda_t} \ln \frac{D}{d_i} + \frac{1}{2 \pi \lambda_{\text{ins}}} \ln \frac{D_{\text{ins}}}{D} + \frac{1}{2 \pi \lambda_p} \ln \frac{D_e}{D_{\text{ins}}} \quad (28)$$

$$R_g = \frac{1}{2 \pi \lambda_f} \cosh^{-1} \left(\frac{2H}{D_e} + \alpha_{eq} \lambda_f \right) \quad (29)$$

$$R_{12} = \frac{1}{2 \pi \lambda_f} \ln \left[1 + \frac{(2H)^2}{C^2} \right] \quad (30)$$

$$H = h + \frac{D_e}{2} \quad (31)$$

Dove α è un coefficiente di scambio termico convettivo, λ_t è la conduttività termica dei tubi, λ_{ins} è la conduttività termica dell'isolamento, λ_p è la conduttività termica della custodia impermeabile, λ_f conducibilità termica del terreno, H è la profondità di posa, α_{eq} è l'equivalente resistenza termica, C è la distanza di posa. I valori della potenza termica dissipata per unità di lunghezza possono quindi essere identificati come q_f per la linea di alimentazione e q_r per la linea di ritorno, entrambi espressi in W/m e calcolati secondo le equazioni (32) - (34):

$$q_f = \frac{(T_f - T_{amb}) (R_g + R_{pipe,r}) - (T_f - T_{amb}) R_{12}}{(R_g + R_{pipe,r}) (R_g + R_{pipe,f}) - R_{12}^2} \quad (32)$$

$$q_r = \frac{(T_r - T_{amb}) (R_g + R_{pipe,f}) - (T_f - T_{amb}) R_{12}}{(R_g + R_{pipe,r}) (R_g + R_{pipe,f}) - R_{12}^2} \quad (33)$$

$$q_{tot} = q_f + q_r \quad (34)$$

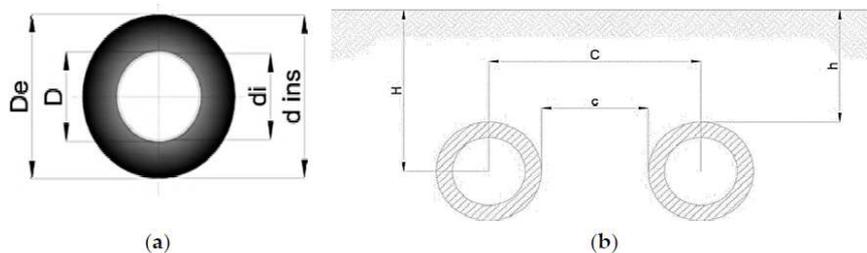


Figura 71:(a) Diametro tubi; D = Diametro esterno tubi; d_i = Diametro interno tubi; D_e = Diametro membrata resistente; d_{ins} = diametro isolante esterno, (b) posizione dei tubi interrati

Tabella 29 - Diametro tubi e isolante.

Diametro DN	Tubi $D \times S$	Isolamento D (mm)	Isolamento (kg/m)
32	42.4 × 2.6	110	4.56
40	48.3 × 2.6	110	5.08
50	60.3 × 2.9	125	6.30

La tabella 29 riporta i diametri utilizzati. La potenza meccanica della pompa di alimentazione per compensare le cadute di pressione è stata calcolata sulla base delle perdite di carico relative alla portata massima della massa d'acqua. Tale condizione si verifica in genere quando i carichi termici dell'edificio sono i più alti. Il funzionamento a carico parziale dell'impianto è assicurato dall'utilizzo di una pompa elettronica a velocità di rotazione variabile caratterizzata da una portata pari a 12 m³/h e una prevalenza idraulica di 11 m. Il foglio dati DAB EVOPLUS SMALL-B 120 / 220.32 M [201] e la curva caratteristica sono stati assunti come riferimenti per i calcoli.

7.2.3-Risultati e discussioni

È stato condotto uno studio parametrico per studiare la risposta del ciclo trans-critico di CO₂ durante le diverse condizioni operative e il modo in cui il sistema ibrido ne è influenzato, se confrontato con una prospettiva di edificio nZEB. In questa sezione sono stati presentati e discussi i principali risultati derivati dai calcoli. Considerando il sistema ibrido, l'energia termica totale è stata stimata dalla somma di quattro pompe di calore a CO₂, dal cogeneratore e dalla HP tradizionale. L'efficienza totale del sistema associata all'uso di combustibili fossili è di 0,8466, considerando l'elettricità acquistata dalla rete nazionale e l'elettricità venduta a causa dell'impiego di pannelli fotovoltaici e micro CHP. La richiesta elettrica e i profili di eccesso di elettricità sono riportati nella figura 72. Secondo l'equazione del bilancio di energia elettrica (16), l'eccesso di elettricità è riportato con valori negativi nella figura 73 poiché tale energia è stata scaricata nella rete. Fondamentalmente, tutti i consumi elettrici sono stati considerati valori positivi, mentre è negativa l'energia elettrica sbilanciata che viene rilasciata dal sistema energetico. Inoltre, quando viene implementata l'opzione di misurazione netta, quell'energia potrebbe essere gestita per ridurre il costo livellato dell'elettricità vendendola ai servizi locali. In alternativa, installando il banco batterie, potrebbe essere conservata per un uso spostato nel tempo.

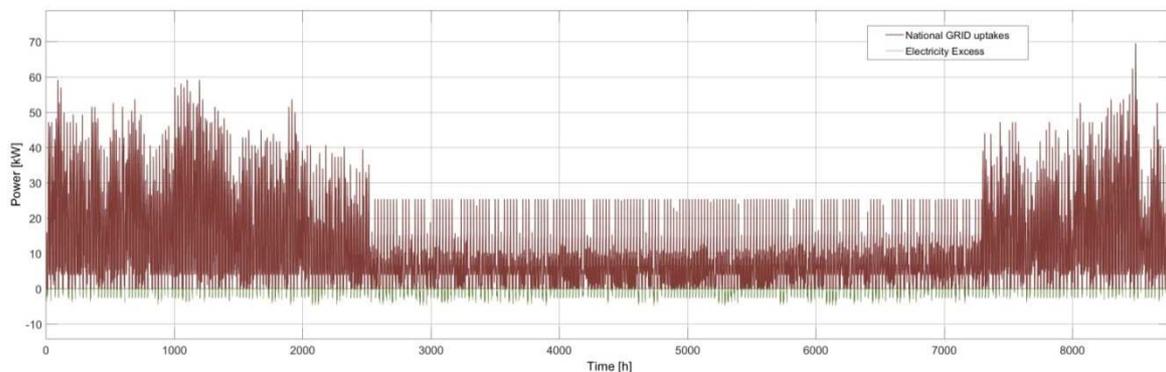


Figura 72: Domanda elettrica ed elettricità in eccesso (in rosso l'energia richiesta in un anno, in verde l'energia prodotta)

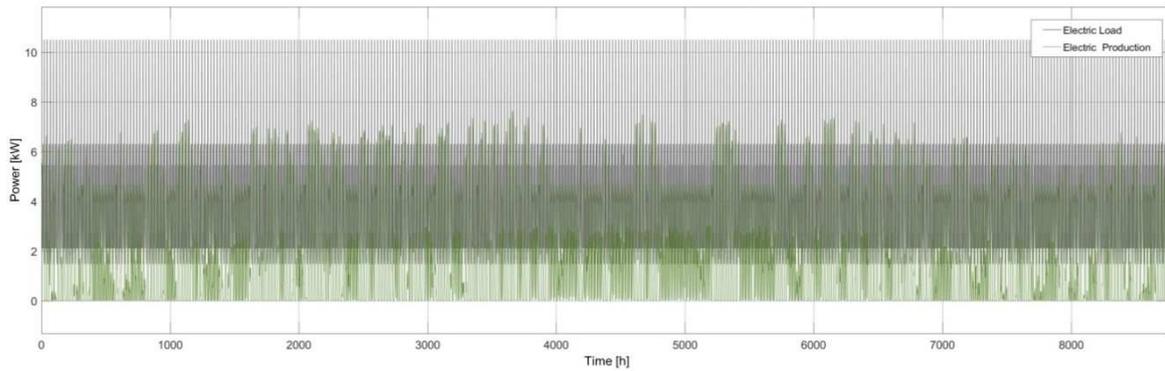


Figura 73: Carichi elettrici e produzione di elettricità da fotovoltaico

Il profilo di potenza in uscita dei pannelli fotovoltaici e il carico elettrico complessivo degli edifici sono sovrapposti nel grafico mostrato nella figura 73. Tutta l'energia del sistema ibrido, ordinata per tipologia, è riassunta nella figura 74a, mentre la figura 74b mostra il fabbisogno elettrico, termico e sanitario del tradizionale sistema energetico.

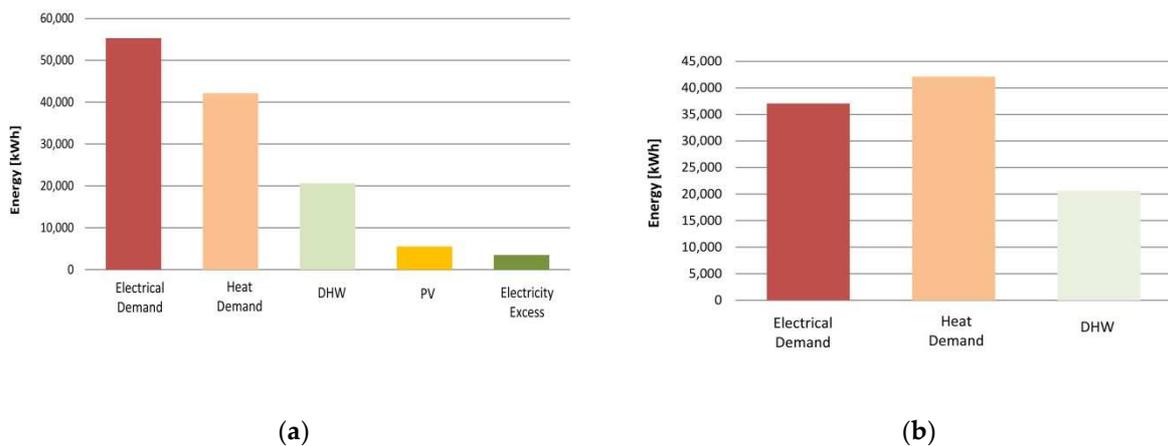


Figura 74: Energia totale prodotta dal sistema ibrido (a) e dal sistema tradizionale (b)

L'efficienza globale è stata stimata considerando gli indicatori di prestazione come precedentemente dettagliato. Confrontando gli scenari energetici, emerge come l'impianto ibrido porti a migliori prestazioni con conseguente efficienza rispetto a quella basata sull'uso di combustibili fossili, pari rispettivamente a 0,5528 e 0,8395 per il sistema energetico tradizionale e quello ibrido. Gli ulteriori indicatori di prestazione energetica sono stati riassunti nella tabella 30 e 31.

Tabella 30 - Comparazione tra il Sistema ibrido e tradizionale.

Indicatori di prestazione energetica	Sistema Ibrido	Sistema tradizionale
Efficienza di riscaldamento	2.31	0.67
Efficienza DHW	0.52	0.80
RES frazione sull'elettricità	0.10	-
frazione di calore rinnovabile	0.42	-

Tabella 31 - Indicatori di performance dei sistemi ibridi e tradizionali trascritici di calore.

Indicatori	Sistema Ibrido	Sistema tradizionale
PEC [kWh]	140,583	177,647
PES [kWh]	37,060	
f_{RES}	0.27	-
Efficienza sistema	0.84	0.55

I risultati della simulazione hanno confermato che l'efficienza è maggiore nel sistema ibrido, dimostrando che l'obiettivo nZEB è più difficile da raggiungere con i combustibili fossili. In effetti, l'impiego di elettricità è facilitato dal sistema ibrido piuttosto che dai combustibili fossili (ad esempio, pompe di calore contro caldaie a combustibili fossili); inoltre, il rapporto di energia rinnovabile non è vicino allo zero perché include energia fuori sede prodotta da fonti rinnovabili [201]. Nel dettaglio, l'efficienza di riscaldamento viene calcolata come rapporto tra il calore totale prodotto e l'energia fossile primaria. Per tale motivo, l'efficienza di riscaldamento è superiore a 1. Infine, l'analisi di sensibilità è stata effettuata modificando i carichi elettrici e termici di -15% e + 15%, in modo da modificare il PTHR dell'edificio, come riportato nelle figure 27 e 28, insieme agli indicatori di prestazione valutati. Qui di seguito, i principali risultati associati ad entrambi i casi sono riassunti:

- Nel primo caso, a causa della maggiore domanda di elettricità, il PEC aumenta; l'energia elettrica aggiuntiva deve essere acquistata dalla rete nazionale. Al contrario, nel secondo caso, quando il carico termico aumenta, il PEC tende a ridursi.
- Quando l'edificio PTHR è più alto, la frazione rinnovabile f_{RES} diminuisce quasi in modo lineare a causa del fatto che l'energia complessiva richiesta è maggiore; Ciononostante, la produzione di elettricità rinnovabile rimane costante e la sua frazione sul consumo finale di elettricità diminuisce di conseguenza.

- Il PES tende ad aumentare leggermente man mano che l'edificio PTHR cresce, a causa della riduzione dell'eccesso di elettricità

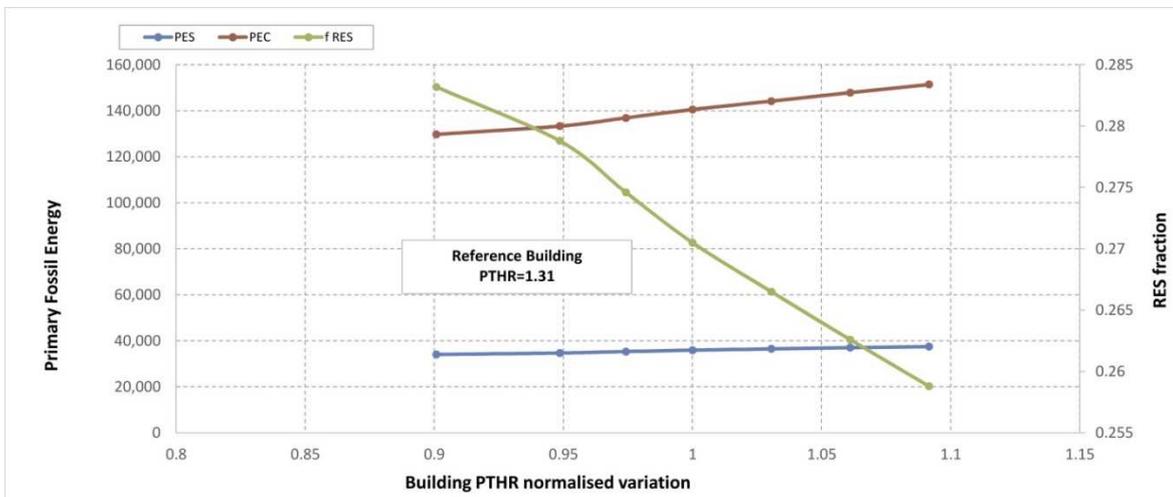


Figura 75: Valori dell'indicatore di prestazione con variazioni dei carichi elettrici dell'edificio

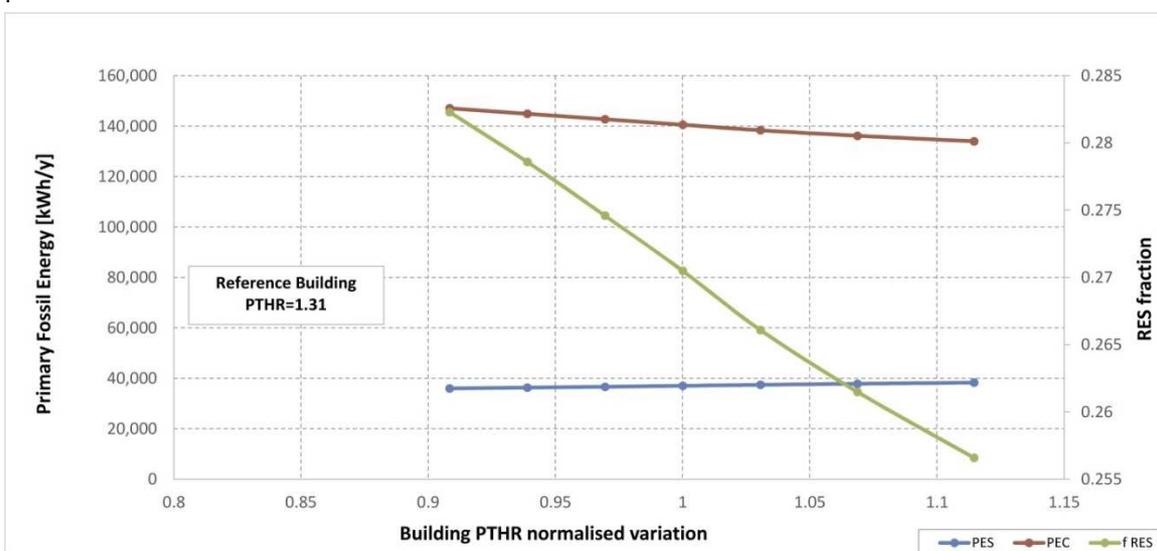


Figura 76: Valori dell'indicatore di prestazione con variazioni dei carichi termici dell'edificio

Le figure 75 e 76, mostrano l'analisi della sensibilità dell'eccesso di elettricità con la variazione del PTHR e dell'edificio, distinguendo anche le quantità rinnovabili e fossili. Vale la pena notare che maggiore è il carico elettrico, implicando un valore PTHR più elevato, minore è l'eccesso di elettricità; viceversa, quando il carico elettrico diminuisce, è disponibile più energia per essere convertita in calore dagli HP o per essere immagazzinata in dispositivi dedicati (vedere la figura 77a). Lo stesso approccio è stato utilizzato per valutare come l'energia rinnovabile può contribuire all'eccesso di

elettricità, modificando il carico termico come mostrato nella figura 77b. Inoltre, le figure 78 e 79 mostrano l'analisi della sensibilità degli indicatori di prestazione con variazioni dei carichi termici ed elettrici rispettivamente quando è collegato un banco di batterie. In particolare, le figure 77 e 78, forniscono i risultati dell'analisi di sensibilità relativi agli indicatori di prestazione del sistema ibrido, una volta che è stato dotato di un sistema di accumulo. Per tali calcoli, l'efficienza di andata e ritorno per il banco di batterie è stata assunta pari a 0,8. Di conseguenza, dai dati riportati nella figura 77 è stato possibile valutare immediatamente l'effettiva elettricità immagazzinabile, che è in grado di influenzare positivamente il consumo di energia fossile primaria dell'edificio e la frazione di RES. Confrontando gli scenari ibridi di riferimento (ovvero costruendo PTHR pari a 1), il sistema ibrido con il dispositivo di accumulo elettrico integrato mostra un'ulteriore riduzione del consumo di energia fossile primaria da 140.583 kWh a 133.909 kWh. Dato che l'eccesso di elettricità è pari a 3503 kWh, l'elettricità utilizzabile dalle batterie è di soli 2802 kWh, a causa delle perdite di energia per il processo di carica e scarica. Di conseguenza, è possibile affermare che l'implementazione di sistemi ibridi complessi insieme allo stoccaggio rappresenta un'opzione praticabile per ridurre il consumo di energia fossile primaria nelle abitazioni. In tal modo, è possibile ottenere un uso più efficace e razionale delle energie rinnovabili, favorendo il percorso verso la qualificazione NZEB associato agli edifici esistenti. Con riferimento alle figure 30 e 31 è degno di nota come la riduzione PEC associata all'applicazione del sistema di accumulo sia maggiore quando la creazione di PTHR è pari a 0,9. In effetti, in quel caso, il vantaggio calcolato è di 8163 kWh, mentre è pari a 5218 kWh quando il PTHR dell'edificio è 1,09. Inoltre, quando il PTHR cambia a causa delle variazioni del carico termico, la linea di tendenza PEC si sposta verso il basso e la sua pendenza è sostanzialmente costante. In ultima analisi, i 3 casi studio sono stati confrontati attraverso un istogramma, che mostra il fabbisogno di energia primaria dell'edificio nel caso del sistema tradizionale, del sistema ibrido e del sistema ibrido con accumulo. L'uso di un sistema di generazione di energia ad alte prestazioni riduce il fabbisogno energetico di quasi il 50%, come mostrato nella figura 80. La figura 80b rappresenta il fabbisogno di energia primaria in base al decreto legislativo 192/05 che attua la direttiva 2002/91 della Comunità europea [203]. Il sistema di certificazione energetica prevede che il contributo dell'illuminazione e della forza motrice non sia conteggiato nel consumo di energia, mostrando un fabbisogno di energia fossile primaria significativamente inferiore. Ai fini della certificazione energetica, vengono presi in considerazione i valori mostrati nella figura 80b. nel caso del sistema di accumulo ibrido, il fabbisogno energetico primario dell'edificio è pari a 74 kWh / m²y, non ancora in linea con quanto riportato nei termini della classificazione NZEB.

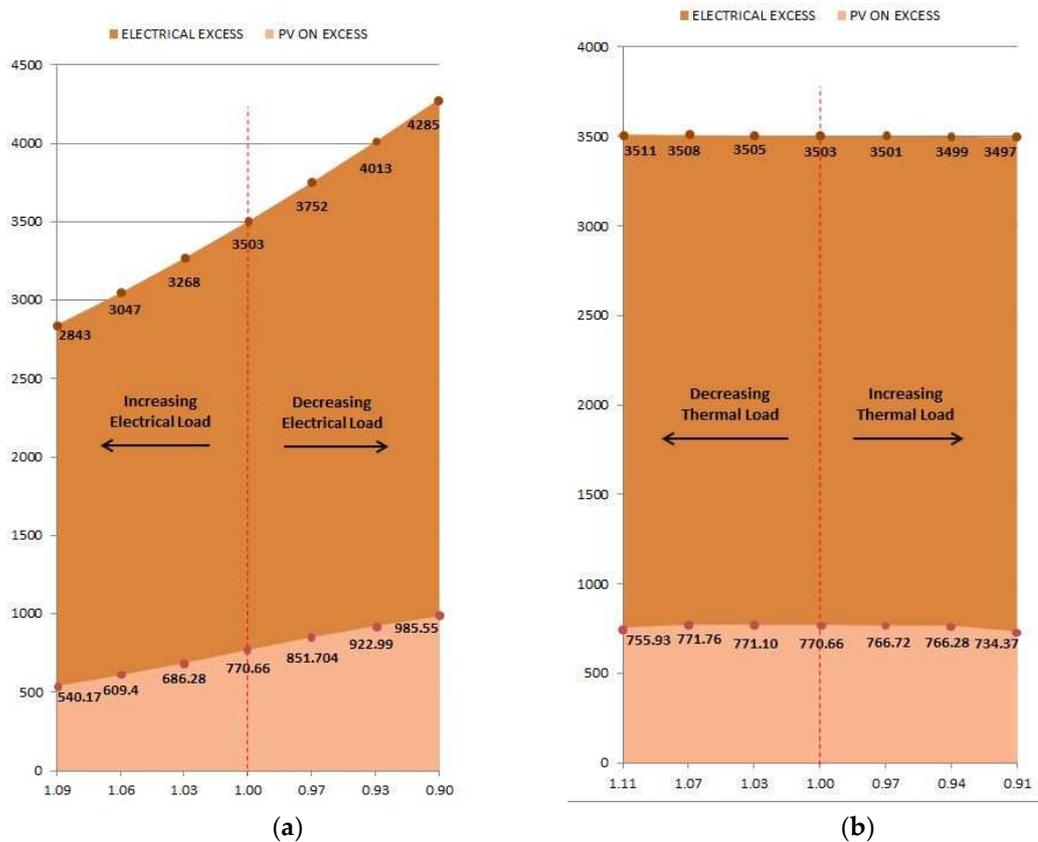


Figura 77: Analisi di sensibilità su eccesso elettrico con variazioni del PTHR normalizzato, aumento del carico elettrico (a) e del carico termico (b)

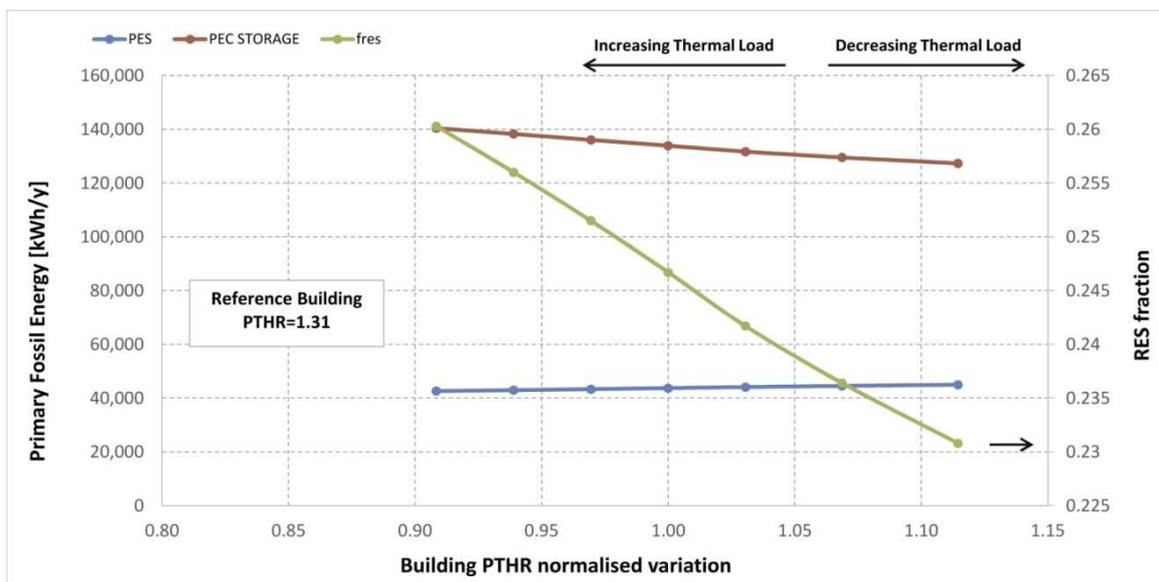


Figura 78: Analisi di sensibilità sugli indicatori di prestazione con variazioni dei carichi termici quando è collegato un banco di batterie

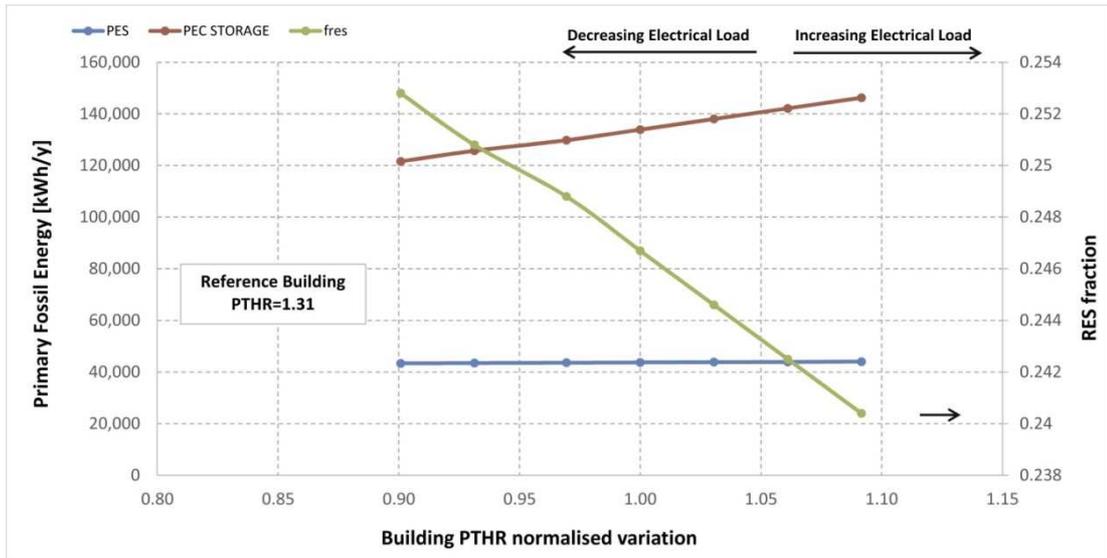


Figura 79: Analisi di sensitività sugli indicatori di prestazione con variazioni dei carichi elettrici, quando è collegato un banco di batterie

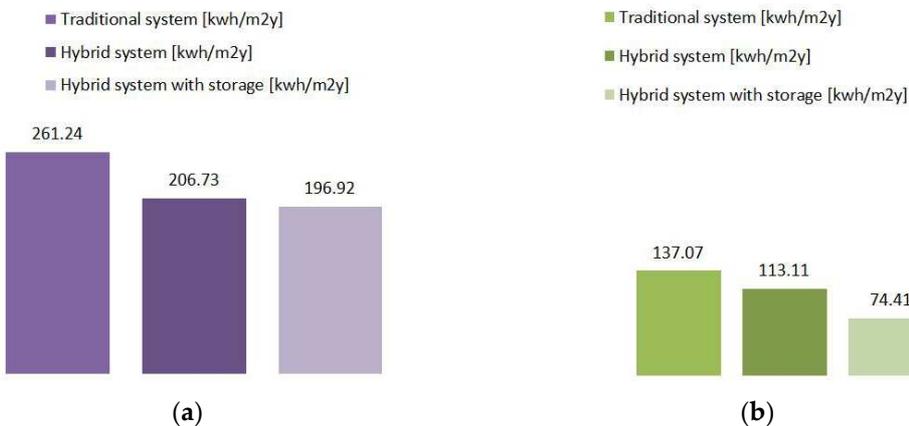


Figura 80: Il fabbisogno di energia fossile primaria di un edificio normalizzato in un anno (a), il fabbisogno di energia fossile primaria di un edificio normalizzato in un anno trascurando il contributo di elettricità (b)

7.2.4-Conclusioni

Questo capitolo ha studiato la possibilità di costruire un nuovo sistema ibrido basato sull'integrazione trans-critica di pompe di calore ad anidride carbonica. In particolare, un dissipatore di calore freddo condiviso per quelle pompe di calore è stato concettualizzato modificando i parametri operativi comuni degli HP trans critici di CO₂. Le fonti rinnovabili insieme al micro-CHP sono state accoppiate per produrre elettricità in loco per la guida degli HP. Effettuando simulazioni dinamiche, emergono i benefici

energetici derivanti dalla valutazione dell'innovativo sistema impiegato. I principali risultati possono essere delineati come segue:

- L'adozione del sistema ibrido proposto porta a un'efficienza globale della prima legge pari a 0,84 anziché 0,55. La frazione rinnovabile ottenibile è del 27% mentre il risparmio di energia primaria corrisponde al 37% circa. L'ampio uso di energie rinnovabili (vale a dire, aerotermico e solare) consente di ottenere un'efficienza di riscaldamento in termini di energia fossile primaria superiore a 2;
- Lo sviluppo della rete di distribuzione a bassa temperatura contribuisce positivamente all'efficienza del sistema a causa delle perdite termiche e della riduzione delle perdite di carico. Anche se la portata dell'acqua è elevata, a causa della differenza di temperatura operativa dell'HP che è limitata a 5°C, il consumo elettrico per il pompaggio dell'acqua è inferiore. Nonostante ciò, i diametri delle tubazioni sono superiori a quelli relativi all'impianto di riscaldamento tradizionale.
- L'uso del fotovoltaico e della cogenerazione rende l'acquisto dell'elettricità accessibile, nonostante una grande quantità di eccesso di elettricità sia venduta alla rete dall'opzione di misurazione della rete. Quando vengono applicati dispositivi di accumulo elettrico, si verifica un migliore sfruttamento dell'energia rinnovabile, aumentando la classificazione energetica degli edifici, in base ai cambiamenti degli indicatori di prestazione;
- Anche se l'efficienza di conversione per la produzione di acqua calda sanitaria è bassa a causa dell'efficienza di recupero del calore della cogenerazione, la potenza elettrica della cogenerazione favorisce la riduzione finale del sistema ibrido PEC;
- Confrontando il sistema ibrido con il dispositivo di accumulo con quello tradizionale, è possibile ottenere un notevole risparmio di energia fossile primaria (-50% circa). Pertanto, maggiore efficienza è stata registrata quando si sostituiscono le tecnologie più comuni con le nuove commerciali e insieme alle soluzioni di condivisione del calore e ai dispositivi di accumulo elettrico. L'integrazione del banco batterie consente di ridurre l'acquisto di energia elettrica dalla rete nazionale incidendo positivamente sui valori PEC;
- Secondo l'analisi di sensibilità, l'edificio PTHR aumenta e il fRES diminuisce costantemente. Tuttavia, il consumo di energia fossile primaria è superiore alle cifre mostrate nel primo scenario, ma il risparmio energetico aumenta.
- Per ottenere la qualifica NZEB, l'adozione di CO₂-HP e l'adozione di sistemi ibridi sono soluzioni praticabili. Il nostro prossimo passo sarà quello di migliorare il sistema ibrido prendendo il potenziale di CO₂ al suo apice

CAPITOLO 8: CONCLUSIONI

Oggi ci troviamo di fronte un forte cambiamento che sta rivestendo numerosi comparti produttivi, dalle industrie agli utilities, riconducibile al Digital Transformation (o trasformazione digitale). In questo nuovo scenario che vede il parco edilizio sempre più efficiente ed una notevole mole di dati mai esistita in passato, avvalersi di strumenti che garantiscano la piena collaborazione fra le parti è divenuta una necessità per offrire la corretta gestione del patrimonio immobiliare. In questo contesto, l'approccio di georeferenziazione dei dati consente agli stakeholder di raggiungere un livello di integrazione più elevato, in cui le informazioni provenienti da una varietà di fonti possono essere facilmente aggregate e collegate ad un unico sito. Questo tipo di integrazione offre un modo perfetto per capitalizzare i dati BIM e sintetizzarli con altri sistemi aziendali, come ad esempio, la gestione delle risorse, la gestione dello spazio a livello di isolato, quartiere o città. L'integrazione del BIM con il sistema di georeferenziazione Web-GIS consente agli utenti di sfruttare il valore in diversi set di dati per abilitare applicazioni tra cui il coinvolgimento dei cittadini, l'analisi della sostenibilità, l'analisi dei rischi ambientali e molti altri usi operativi. L'ultima barriera che dovrà essere del tutto infranta sarà il confine tra modello digitale e l'edificio reale.

Per raggiungere gli obiettivi sopra menzionati, la ricerca è stata strutturata su tre macro-aree fondamentali:

1 – L'INTEROPERABILITÀ TRA MODELLO DIGITALE INFORMATIVO DELL'EDIFICIO E MODELLO ENERGETICO

2 – LA GEOINFORMAZIONE PER LA SPECIFICITÀ DEL DATO E LA SUA IMPORTANZA PER UNA CITTÀ INTELLIGENTE.

3 – L'APPLICAZIONE DEGLI SMART ENERGY SYSTEM PER CONTRIBUIRE ALLA SOSTENIBILITÀ

1 – Il passaggio di informazioni tra il modello informativo dell'edificio e il modello energetico digitale al momento avviene in diversi modi. Il primo caso è quello della realizzazione di un modello semplificato che contiene i dati necessari alle valutazioni energetiche, esportato tramite il formato .gbXML. Ci sono poi alcuni strumenti che, grazie all'utilizzo di algoritmi o di interfacce grafiche semplificate permettono di migliorare la qualità del flusso di trasformazione e di sintetizzare il modello digitale. In questo caso la criticità riscontrata riguarda la semplificazione forzata dei dati che avviene quando si utilizza un formato scambio .gbxml, in special modo per modelli

complessi, che può generare alcuni errori di valutazione. Di fatto, quando si lavora su un modello semplificato, non si ha la totale visione dell'edificio (ed anche del modello digitale) e ciò potrebbe condurre a delle scelte che risultano ottimali dal punto di vista energetico ma in conflitto con la condizione reale e integrale dell'edificio. Il processo alternativo vede l'utilizzo del formato IFC come mezzo per lo scambio di informazioni BIM to BEM. In questo caso il formato di scambio risulta essere personalizzabile per quanto riguarda le informazioni da inserire, tuttavia questa assenza di confini potrebbe rendere il processo di interoperabilità rischioso. Se le informazioni del modello informativo digitale non vengono semplificate, la totalità dei dati trasmessi è letta in modo singolare e in stretta dipendenza al software di destinazione. Inoltre, attualmente il mercato offre una varietà ridotta di strumenti in grado di leggere direttamente il formato file IFC, preferendo piuttosto il gbXML. Per l'utilizzo energetico del file IFC, come avvenuto nel caso studio con IDA-ICE, è necessario un controllo minuzioso delle informazioni inserite da parte dell'operatore, verificando che esse vengano effettivamente e correttamente importate. Nei diversi casi studio affrontati sono stati presi in esame i problemi di interoperabilità BIM-BEM sia in ambito IFC che gbXML per mezzo di strumenti differenti. Lo studio si è concentrato sull'utilizzo di IDA-ICE per le simulazioni energetiche, Ladybug-Honeybee per le simulazioni di luce diurna, Simple BIM, Dynamo e Grasshopper come middleware. Il risultato finale è stato quello di ottenere una buona trasmissione delle informazioni anche se semplificata, che ha permesso di simulare e analizzare i diversi casi studio con minime percentuali di errore, evidenziando la necessità di ulteriori investigazioni per chiarire tutti gli aspetti di casi studio più complessi (es Caso studio Complesso).

2 – A partire dall'ipotesi di un flusso dati dal BIM al BEM perfetto, ovvero dalla capacità del software di simulazione energetica di replicare perfettamente il comportamento dell'edificio reale, la ricerca si è focalizzata sul suo inserimento nell'ambiente circostante urbano. La mole di dati generata dalle simulazioni che quotidianamente vengono effettuate dai professionisti, deve essere gestita e archiviata correttamente. La ricerca ha mostrato un flusso di lavoro per la definizione di un ambiente web tridimensionale in grado di supportare la visualizzazione di dati energetici sull'ambiente costruito. Le informazioni contenute negli Output energetici sono state implementate sinteticamente nella piattaforma web fondata su un GIS 3D. Il flusso di lavoro è replicabile in diversi contesti e flessibile nell'uso dall'edificio alla scala urbana. È stato costruito un database spaziale in grado di archiviare le informazioni mantenendo memoria dei risultati ottenuti, garantendo la possibilità di accesso e utilizzo in qualsiasi momento nel tempo da tutti. Nonostante la ricerca sia basata su un primo approccio al tema, ha riscontrato un grande valore lasciando notevoli opportunità di investigazione futura. L'implementazione dei modelli di città per l'analisi degli usi e dei consumi

energetici del patrimonio immobiliare offre infatti vantaggi soprattutto in termini di confronto e comunicazione. La previsione di un modello tridimensionale navigabile rende la comprensione di enormi set di dati più spontanea rispetto ai casi tradizionali in cui le informazioni numeriche sono presentate in tabelle o con il supporto di mappe bidimensionali. Ciò porta inoltre alla possibilità di includere una più ampia gamma di parti interessate nei dibattiti che toccano il tema della domanda e del risparmio energetico. Lo strumento basato sul web-client consente di condividere una piattaforma comune tra diversi tipi di stakeholder con l'obiettivo di capitalizzare al meglio i dati raccolti e generati. Per gli utenti finali, la comprensione delle informazioni sul comportamento energetico degli edifici può stimolare la consapevolezza energetica, mentre per gli stessi proprietari e i facility manager, la rappresentazione immediata della domanda energetica e delle proprietà termiche del patrimonio edilizio può essere utilizzata come supporto al processo decisionale.

3 – Ciò che si è cercato di realizzare attraverso le analisi, non è solo una verifica sul funzionamento e sull'efficienza o rendimento dell'impianto, bensì si è cercato di evidenziare le criticità o i fattori che meriterebbero un maggiore approfondimento, al fine di definire ulteriori strategie energetico-ambientali. Il cambiamento climatico e il riscaldamento globale impongono un cambio di paradigma rivolto ad un utilizzo migliore delle risorse e in una più efficiente gestione: la produzione dell'energia, il consumo e la sua distribuzione sono parte integrante di questa prospettiva. Da qui l'impiego degli smart energy system che comprendono la produzione di energia elettrica, il riscaldamento e il raffrescamento termico. A seguito delle analisi condotte sul caso studio in ottica nZEB è possibile tracciare uno scenario conclusivo in merito al tema delle future dinamiche di efficientamento energetico nel settore edilizio, nella fattispecie nell'ambito residenziale. È stata studiata l'adozione degli smart energy systems per la riduzione delle emissioni di CO₂ attraverso la costruzione di un nuovo sistema ibrido basato sull'integrazione trans-critica di pompe di calore ad anidride carbonica. È stato concettualizzato un dissipatore di calore freddo condiviso per quattro pompe di calore modificando i parametri operativi comuni degli HP trans-critiche a CO₂. Le fonti rinnovabili insieme al micro-CHP sono state accoppiate per produrre elettricità in loco. I risultati hanno dimostrato l'efficienza del sistema ibrido in confronto a quello tradizionale.

In conclusione, i tre filoni di ricerca si sono basati sul principio di un futuro rivolto alle smart cities ovvero, città in cui le informazioni non sono solo disponibili ma anche reperibili e accessibili alle persone, rendendole in grado di utilizzarle in funzione delle necessità.

8.1-Sviluppi Futuri

In quanto tecnologia di supporto all'energia sostenibile, gli strumenti BIM sono piattaforme e processi fondamentali per contribuire alla riduzione dell'impronta di carbonio nel settore delle costruzioni. Il dato legato all'ambiente digitale è la spina dorsale del nuovo modo di lavorare "informato", mirato alla gestione del "pieno contenuto energetico" dell'edilizia, richiedendo di riconsiderare il modo in cui è stata trattata fino ad oggi. Tale è l'impatto del BIM che la Commissione Europea ha sostenuto e promosso diverse politiche e iniziative volte a promuovere la digitalizzazione nel settore delle costruzioni. È essenziale che la progettazione globale e le soluzioni per il sistema smart puntino non solo a una sostenibilità ambientale, ma anche economica e socialmente fattibile. In questo processo di trasformazione, la gestione dei Big Data ha un ruolo determinante con soluzioni di Internet of Things, che non sono solo diffuse ma anche incorporate, permettendo di svolgere analisi predittive. Il corretto sviluppo della piattaforma web 3D può diventare uno strumento efficace in grado di attivare e guidare il processo decisionale verso l'applicazione delle politiche energetiche. Gli sviluppi futuri saranno sicuramente incentrati nello sviluppo approfondito dell'organizzazione e della gestione del database geo spaziale al fine di costruire una procedura ottimale per aiutare le pubbliche amministrazioni o le aziende pubbliche o private nella gestione dei dati energetici del parco edilizio nazionale.

BIBLIOGRAFIA

1. COMUNICAZIONE DELLA COMMISSIONE EUROPA 2020, Bruxelles, 3.3.2010 COM(2010) 2020 https://ponculturaesviluppo.beniculturali.it/my_uploads_pcs/2018/06/STRATEGIA-EUROPA-2020.pdf
2. DIRETTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN>
3. DIRETTIVA (UE) 2018/844 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica [<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844&from=EN>]
4. DIRETTIVA 2012/27/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 25 ottobre 2012 [<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=IT>]
5. Web site - EU 2020 target for energy efficiency https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/targets-directive-and-rules/eu-targets-energy-efficiency_en
6. Principles for nearly Zero-Energy Buildings , Authors: Kirsten Engelund Thomsen, Jørgen Rose, Søren O. Aggerholm, Published in November 2011 by Buildings Performance Institute Europe (BPIE) http://bpie.eu/documents/BPIE/publications/LR_nZEB%20study.pdf Available in September 2020
7. Web site - PROGETTO ASIEPI <https://www.rehva.eu/eu-projects/project/asiepi> - Summary report [asiepi_access_the_results_en](https://www.rehva.eu/eu-projects/project/asiepi_access_the_results_en). Available in September 2020
8. Web site - PROGETTO ENTRANZE- REPORT ENTRANZE_Integration_of_report_D5.1_D5.2_D5.3_final. <https://www.entranze.eu/> Available in September 2020
9. Web site - PROGETTO RENEW SCHOOL <https://www.renew-school.eu/en/about/> Available in September 2020
10. Web site - INTELLIGENT ENERGY EUROPE WEBSITE <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/> Available at September 2020
11. Oliveira Panão, M. J. N., Rebelo, M. P., & Camelo, S. M. L. (2013). How low should be the energy required by a nearly zero-energy building? the load/generation energy balance of mediterranean housing. *Energy and Buildings*, 61, 161-171. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.02.031
12. Silva, P. C. P., Almeida, M., Bragança, L., & Mesquita, V. (2013). Development of prefabricated retrofit module towards nearly zero energy buildings. *Energy and Buildings*, 56, 115-125. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.09.034.
13. Desideri, U., Arcioni, L., Leonardi, D., Cesaretti, L., Perugini, P., Agabiti, E., & Evangelisti, N. (2014). Design of a multipurpose "zero energy consumption" building according to european directive 2010/31/EU: Life cycle assessment. *Energy and Buildings*, 80, 585-597. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.027.
14. Ferrara, M., Fabrizio, E., Virgone, J., & Filippi, M. (2014). A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly zero energy buildings. *Energy and Buildings*, 84, 442-457. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.08.031.
15. Ferrante, A., & Cascella, M. T. (2011). Zero energy balance and zero on-site CO2 emission housing development in the mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 43(8), 2002-2010. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.04.008.
16. Schimschar, S., Blok, K., Boermans, T., & Hermelink, A. (2011). Germany's path towards nearly zero-energy buildings-enabling the greenhouse gas mitigation potential in the building stock. *Energy Policy*, 39(6), 3346-3360. doi: 10.1016/j.enpol.2011.03.029.
17. Web site - PROGETTO CoNZEB <https://www.conZEBs.eu/> Available in September 2020
18. Web site - PROGETTO CRAVEzero <https://cravezero.eu/> Available in September 2020
19. Web site - PROGETTO A-ZEB <https://azeb.eu/> Available in September 2020
20. Web site - PROGETTO ZEBRA2020 <https://zebra2020.eu/> Available in September 2020
21. Web site - EU countries' nearly zero-energy buildings national plans https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings/nearly-zero-energy-buildings/eu-countries-nearly-zero-energy-buildings-national-plans-0_en?redir=1 Available in September 2020
22. Web site - RELAZIONE DELLA COMMISSIONE AL PARLAMENTO EUROPEO E AL CONSIGLIO Progressi realizzati dagli Stati membri in materia di edifici a energia quasi zero [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0483R\(01\)&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0483R(01)&from=EN) Available in September 2020

23. Web site - COMMISSION RECOMMENDATION (EU) 2016/1318 of 29 July 2016 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016H1318&from=EN> Available in September 2020
24. D'Agostino, D., Zangheri, P., Cuniberti, B., Paci, D., Bertoldi, P. (2016). Synthesis Report on the National Plans for Nearly Zero Energy Buildings (NZEBs) 2016.
25. Web site - CA EPBD, Concerted Action EPBD: report from Malmo meeting 10th-11th October 2013. Implementing the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD). Website with information on the joint initiative of the EU Member States and the European Commission, available at: <http://www.epbd-ca.eu/countries/country-information>. Available in September 2020
26. Web site - Studio completo sulla costruzione di attività di risanamento energetico e assorbimento di edifici a energia quasi zero nell'UE Rapporto finale – Studio [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0483R\(01\)&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0483R(01)&from=EN) Available in September 2020
27. Web site - ZEBRA20200 - Data Tool <https://zebra-monitoring.enerdata.net/nZEB-activities/nZEB-definitions-by-country.html> Available in September 2020
28. Köhler, B., Stobbe, M., Moser, C., Garzia F. (2018). Report on cost reduction potentials for technical NZEB solution sets, August 2018, CRAVEzero - Grant Agreement No. 741223
29. Web site - Piano nazionale per incrementare il numero di “edifici a energia quasi zero” Orientamenti e linee di sviluppo. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/italy_it_version.pdf Available in September 2020
30. Web site - data mapper : https://ec.europa.eu/energy/eu-buildings-datamapper_en Available in September 2020
31. G. Paoletti, G., Pascual Pascuas, R., Perneti, R., & Lollini, R. (2017). Nearly Zero Energy Buildings: An Overview of the Main Construction Features across Europe. In “Buildings”, 7(2), 43.
32. Web site - Accordo Parigi Website https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_it Available in September 2020
33. Pascual, R., Paoletti G. (2016). ZEBRA2020: NEARLY ZERO-ENERGY BUILDING STRATEGY 2020 Deliverable 5.1: Nearly Zero-Energy Building (nZEB) technology solutions, cost assessment and performance, September 2016
34. Web site - Direttiva 244/2012 - <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:081:0018:0036:IT:PDF>
35. Web site - https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/it/IP_16_4009 Available at September 2020
36. Guardigli, L., Bragadin, M.A., Della Fornace, F., Mazzoli, C., Prati, D. (2018). Energy retrofit alternatives and cost-optimal analysis for large public housing stocks. *Energy Building*, 166, 48–59.
37. Dall’O’, G.; Galante, A.; Pasetti, G. (2012) A methodology for evaluating the potential energy savings of retrofitting residential building stocks. *Sustainable Cities Society*, 4, 12–21.
38. De Santoli, L., Mancini, F., Nastasi, B., Ridolfi, S. (2017). Energy retrofitting of dwellings from the 40’s in Borgata Trullo-Rome. *Energy Procedia*, 133, 281–289.
39. Mancini, F., Salvo, S., Piacentini, V. (2016). Issues of Energy Retrofitting of a Modern Public Housing Estates: The ‘Giorgio Morandi’ Complex at Tor Sapienza, Rome, 1975–1979. *Energy Procedia*, 101, 1111–1118.
40. Web site - http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DICA_EDIFICI1 Available at September 2020
41. Costanzo, E., Basili, R., Hugony, F., Misceo M., Pallottelli, R., Zanghitella, F., Labia, Nicola. Osservatorio edifici nzeb 2016-2018 ENEA, ISBN: 978-88-8286-375-3
42. Web site - STREPIN, STRategia per la Riqualficazione Energetica del Parco Immobiliare Nazionale, Allegato1, 2015, https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/STREPIN_13_11_2015.pdf Available in September 2020
43. Cooper, R., Aouad, G., Lee, A., Wu, S., & Fleming, A. (2005). *Process management in design and construction*. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
44. Ashcraft, H. W. (2008). *Building Information Modelling: A Framework for Collaboration*. *Construction Lawyer*, 28(3), 1–14.
45. Aouad, G., & Arayici, Y. (2010). *Requirements Engineering for Computer Integrated Environments in Construction*. WILEY-BLACKWELL.
46. Bernstein, P.G, Pittman, J. H. (2004). *Barriers to the adoption of Building Information Modelling in the building industry*. Autodesk, USA.
47. Becerik-Gerber, B., & Rice, S. (2010). The perceived value of building information modeling in the US building industry. *ITcon*, 15(February), 185–201.

48. Love, P. E. D., Matthews, J., Simpson, I., Hill, A., & Olatunji, O. a. (2014). A benefits realization management building information modeling framework for asset owners. *Automation in Construction*, 37, 1–10. doi:10.1016/j.autcon.2013.09.007
49. Manning, R. and Messner, J. (2008). Case studies In BIM implementation for programming of healthcare facilities. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, 13, 446-457.
50. Poerschke, U., Holland, R. J., Messner, J. I., & Pihlak, M. (2019). BIM collaboration across six disciplines. Paper presented at the EG-ICE 2010 - 17th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering.
51. Web site - Autodesk. (2002). Building Information Modelling, white paper. Retrieved from http://www.laiserin.com/features/bim/autodesk_bim.pdf Available at September 2020
52. Web site - NIBS. (2007). National building information modelling standard -version 1.0 - part 1: overview, principles and Methodologies. USA. <https://www.nationalbimstandard.org/> Available at September 2020
53. Eastman, C, Teicholz, P., Sacks, R. Liston, K. (2008). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. New York: John Wiley and Sons.
54. Eastman, C. M., Jeong, Y.-S., Sacks, R., & Kaner, I. (2010). Exchange Model and Exchange Object Concepts for Implementation of National BIM Standards. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(1), 25.
55. Eastman, C., & Augenbroe, G. (1998). Product modeling strategies for today and the future. CIB REPORT, 191–208. Retrieved from <http://itc.scix.net/data/works/att/w78-1998-20.content.pdf>
56. Eastman, C.M. (2011) *BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. 2nd; 2 ed. Chichester; Hoboken, N.J: Wiley.
57. Eastman, C., Fisher, D., Lafue, G., Lividini, J., Stocker, D., Yessios, C. (1974). An Outline of the Building Description System- Institute of Physical Planning, Research Report No 50.
58. Eastman C. (1975). The use of computers instead of drawings in building design. *AIA Journal*;63(3):46-50.
59. Li, X., Wu, P., Shen, G. Q., Wang, X., & Teng, Y. (2017). Mapping the knowledge domains of building information modeling (BIM): A bibliometric approach. *Automation in Construction*, 84, 195-206. doi:10.1016/j.autcon.2017.09.011
60. Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357-375. doi:10.1016/j.autcon.2008.10.003
61. Succar, B. (2015) *BIM ThinkSpace: BIM Maturity, BIM Think Space*. Available at: <http://www.bimthinkspace.com/bim-maturity/> Available at September 2020
62. Turk, Ž. (2016). Ten questions concerning building information modelling. *Building and Environment*, 107, 274-284. doi:10.1016/j.buildenv.2016.08.001
63. Saieg, P., Sotelino, E. D., Nascimento, D., & Caiado, R. G. G. (2018). Interactions of building information modeling, lean and sustainability on the architectural, engineering and construction industry: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 174, 788-806. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.030
64. Kymmell, W. (2008). *Building information modelling : Planning and managing construction projects with 4 D cad and simulations*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
65. Jernigan, F. (2008). *BIG BIM little BIM, Second Edition, (Second.)*. 4Site Pres, USA.
66. McGraw-Hill Construction. (2014). *SmartMarket Report The Business Value of BIM for Construction in Major Global Markets : SmartMarket Report*.
67. Baldwin, M. (2013). *BIM in the Middle East: A need for openBIM guides, Stnadrsd and manuals*. BIM user day presentation, Doha, Qatar
68. Web site - BuildingSMART. (2014). <http://www.buildingsmart-tech.org/>. Available at September 2020
69. Anumba, C. J., Pan, J., Issa, R. R. a., & Mutis, I. (2008). Collaborative project information management in a semantic web environment. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 15(1), 78–94.
70. Babič, N. C., Podbreznik, P., & Rebolj, D. (2010). Integrating resource production and construction using BIM. *Automation in Construction*, 19(5), 539-543. doi:10.1016/j.autcon.2009.11.005
71. Web site - Vokes, C., et al, *Technology and skills in the construction industry: Evidence report 74, UKCES, 2013*, www.ukces.org.uk/assets/ukces/docs/publications/evidence-report-74-technology-skills-construction.pdf
72. AIA, *Integrated project delivery: A guide: Version 1*, AIA, Washington DC, 2007
73. Amarnath, C. B., Sawhney, A., Maheswari, U. J. (2011). Cloud computing to enhance collaboration, coordination and communication in the construction industry. *Information and Communication Technologies (WICT) World Congress, Mumbai*, 11–14
74. Web site - SAS, *Big data: what it is and why it matters*, www.sas.com/en_us/insights/big-data/what-is-big-data.html
75. Zhou, Y., Ding, L. Y., & Chen, L. J. (2013). Application of 4D visualization technology for safety management in metro construction. *Automation in Construction*, 34, 25-36. doi:10.1016/j.autcon.2012.10.011.
76. Mitchell, D. (2012). 5D: Creating cost certainty and better buildings. Paper presented at the EWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction - Proceedings of the European Conference on Product and Process Modelling 2012, ECPPM 2012, 253-258

77. Sanhudo, L., Ramos, N. M. M., Poças Martins, J., Almeida, R. M. S. F., Barreira, E., Simões, M. L., & Cardoso, V. (2018). Building information modeling for energy retrofitting – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 249-260. doi:10.1016/j.rser.2018.03.064
78. Wang, C., & Cho, Y. K. (2015). Performance evaluation of automatically generated BIM from laser scanner data for sustainability analyses. Paper presented at the *Procedia Engineering*, , 118 918-925. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.531
79. Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., & Griffith, B. T. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4), 661-673. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.027
80. Attia, S., Beltrán, L., De Herde, A., & Hensen, J. (2009). "Architect friendly": A comparison of ten different building performance simulation tools. Paper presented at the *IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009*, 204-211.
81. Maskil-Leitan, R., & Reychav, I. (2019). BIM's social role in building energy modeling. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(2), 307-338. doi:10.1007/s10098-018-1637-9
82. Farzaneh, A., Monfet, D., & Forgues, D. (2019). Review of using building information modeling for building energy modeling during the design process. *Journal of Building Engineering*, 23, 127-135. doi:10.1016/j.jobe.2019.01.029
83. Pezeshki, Z., Soleimani, A., & Darabi, A. (2019). Application of BEM and using BIM database for BEM: A review. *Journal of Building Engineering*, 23, 1-17. doi:10.1016/j.jobe.2019.01.021
84. Lin, S. -, & Gerber, D. J. (2014). Evolutionary energy performance feedback for design: Multidisciplinary design optimization and performance boundaries for design decision support. *Energy and Buildings*, 84, 426-441. doi:10.1016/j.enbuild.2014.08.034
85. Solnosky, R. (2013) Process modeling focusing on BIM and interdisciplinary design relating to structural planning and design. *Architectural Engineering Conference* pp. 477–485. DOI: 10.1061/9780784412909.046
86. Koppinen, T., Kiviniemi, A. (2007) Requirements management and critical decision points, *VTT Working Papers* 74, ISBN 978-951-38-7153-6.
87. Korkmaz, S., Messner, J. I., Riley, D. R., & Magent, C. (2010). High-performance green building design process modeling and integrated use of visualization tools. *Journal of Architectural Engineering*, 16(1), 37-45. doi:10.1061/(ASCE)1076-0431(2010)16:1(37)
88. Wong, K.-d., Fan, Q. (2013). Building information modelling (BIM) for sustainable building design, *Facilities* 31 (3/4) 138–157.
89. Attia, S., Walter, E., Andersen, M. (2013). Identifying and modelling the integrated design process of net zero energy buildings. *Proceedings of the High Performance Buildings-Design and Evaluation Methodologies Conference*.
90. Lee, Y.G. (2016). Developing a design supporting system in the real-time manner for lowenergy building design based on BIM. *International Conference on Human-Computer Interaction*. DOI:10.1007/978-3-319-40542-1_81
91. Negendahl, K. (2015). Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models. *Automation in Construction*, 54, 39-53. doi:10.1016/j.autcon.2015.03.002
92. Toth, B., Janssen, P., Stouffs, R., Chaszar, A., & Boeykens, S. (2012). Custom digital workflows: A new framework for design analysis integration. *International Journal of Architectural Computing*, 10(4), 481-500. doi:10.1260/1478-0771.10.4.481
93. Hensen, J. (2004). Towards more effective use of building performance simulation in design, *OAI*
94. Bazjanac, V. (2005). Model based cost and energy performance estimation during schematic design. *Proceedings of the 22nd Conference on Information Technology in Construction*.
95. Web site - *Dynamo-BIM*, 2016. Available from: (<http://dynamobim.org/>). Available at September 2020
96. Lagios, K., Niemasz, J., Reinhart, C.F. (2010). Animated building performance simulation (ABPS)—linking rhinoceros/grasshopper with radiance/daysim, *IBPSA-USA J. 4 (1)* 321–327.
97. Michael Pelken, P., Zhang, J., Chen, Y., Rice, D. J., Meng, Z., Semahegn, S., . . . Ling, F. (2013). "Virtual design studio"-part 1: Interdisciplinary design processes. *Building Simulation*, 6(3), 235-251. doi:10.1007/s12273-013-0110-2
98. Mengana, S., Mousiadis, T. (2016). Parametric BIM: Energy Performance Analysis Using Dynamo for Revit. *Master Thesis* no 447
99. Web site - *IES-VE*. Available from: (<https://www.iesve.com/>). Available at September 2020
100. Judkoff R. e Neymark J. (1995). *International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method*. NREL/TP-472-6231 National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.
101. Neymark. J. e Judkoff, R. (2002). *International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method for Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Equipment Models (HVAC BESTEST)*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.
102. Kamel, E., & Memari, A. M. (2019). Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions. *Automation in Construction*, 97, 164-180. doi:10.1016/j.autcon.2018.11.008

103. Web site - <https://www.buildingenergysoftwaretools.com/> Available at September 2020
104. Crawley D. B., Hand J. W., Kummert M. e Griffith B. T. (2005). Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs. Proceedings of Building Simulation 2005, Montreal, Quebec, Canada, IBPSA, 231-238 pp.
105. Fabrizio E., Guglielmino D. e Rollino L. (2010). Software per il progetto sostenibile. Aicarr journal 01/2010; 4:60-66.
106. Judkoff R., Wortman B., O'Doherty B. e Burch J. (2008). A Methodology for Validating Building Energy Analysis Simulations. NREL/TP-550-42059 National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.
107. Bahar, Y. N., Pere, C., Landrieu, J., & Nicolle, C. (2013). A thermal simulation tool for building and its interoperability through the building information modeling (BIM) platform. Buildings, 3(2), 380-398. doi:10.3390/buildings3020380
108. Wen, L., & Hiyama, K. (2016). A review: Simple tools for evaluating the energy performance in early design stages. Paper presented at the Procedia Engineering, , 146 32-39. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.349
109. Attia, S. G., & De Herde, A. (2011). Early design simulation tools for net zero energy buildings: A comparison of ten tools. Paper presented at the Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation
110. Bazjanac, V. (2010). Space boundary requirements for modeling of building geometry for energy and other performance simulation. Proceedings of the CIB W78: 27th International Conference –Cairo, Egypt, 16 - 18 November
111. Maile, T., Fischer, M., Bazjanac, V. (2007). Building energy performance simulation tools-a life-cycle and interoperable perspective, Stanford University, Stanford, CA, USA
112. Pinheiro, S., Wimmer, R., O'Donnell, J., Muhic, S., Bazjanac, V., Maile, T., . . . van Treeck, C. (2018). MVD based information exchange between BIM and building energy performance simulation. Automation in Construction, 90, 91-103. doi:10.1016/j.autcon.2018.02.009
113. Gourlis, G., & Kovacic, I. (2017). Building information modelling for analysis of energy efficient industrial buildings – A case study. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68, 953-963. doi:10.1016/j.rser.2016.02.009
114. CIC, BIM Project Execution Planning Guide Version 2.1, Pennsylvania State University, Computer Integrated Construction Research Group, 2011
115. Web site - <https://gbs.autodesk.com/GBS/> Available in September 2020
116. Web site - <https://www.equa.se/en/ida-ice> Available in September 2020
117. Pompei, L., Spiridigliozzi, G., de Santoli, L., Cornaro, C., & Bisegna, F. (2020). Testing the BIM-ladybug tools interoperability: A daylighting simulation workflow. Paper presented at the Building Simulation Applications, 2020-June 149-156.
118. Mancini, F., Clemente, C., Carbonara, E., & Fraioli, S. (2017). Energy and environmental retrofitting of the university building of orthopaedic and traumatological clinic within sapienza città universitaria. Paper presented at the Energy Procedia
119. Mancini, F., Basso, G. L., & De Santoli, L. (2019). Energy use in residential buildings: Characterisation for identifying flexible loads by means of a questionnaire survey. Energies, 12(11) doi:10.3390/en12112055
120. Yujie L., Zhilei W., Ruidong C., Yongkui L. (2017). Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions. Automation in construction, 83, 134 – 148
121. Basbagill, J., Flager, F., Lepech, M., & Fischer, M. (2013). Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. Building and Environment, 60, 81-92. doi:10.1016/j.buildenv.2012.11.009
122. Steel, J., Drogemuller, R., Toth, B. (2012). "Model interoperability in building information modelling", Software and Systems Modeling 11(1):99-109 DOI: 10.1007/s10270-010-0178-4
123. Saieg, P., Sotelino, E. D., Nascimento, D., & Caiado, R. G. G. (2018). Interactions of building information modeling, lean and sustainability on the architectural, engineering and construction industry: A systematic review. Journal of Cleaner Production, 174, 788-806. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.030
124. UNI/TS 11300-2:2019, Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali.
125. Web site - <https://simplebim.com/> Accessible in September 2020
126. De Santoli, L., Basso, G. L., Spiridigliozzi, G., & Garcia, D. A. (2018). Innovative hybrid energy systems for heading towards NZEB qualification for existing buildings. Paper presented at the Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2018, doi:10.1109/IEEEIC.2018.8494544
127. Gigliarelli, E., Calcerano, F., Calvano, M., Ruperto, F., Sacco, M., & Cessari, L. (2017). Integrated numerical analysis and building information modeling for cultural heritage. Paper presented at the Building Simulation Applications, , 2017-February 105-112..

128. Halonen, L., E. Tetri, and P. Bhusal. 2010. Guidebook on energy efficient electric lighting for buildings. Espoo, Finland: Aalto University School of Science and Technology.
129. Ivanova, I., Kiesel, K., & Mahdavi, A. (2015). BIM-generated data models for EnergyPlus: A comparison of gbXML and IFC formats. Paper presented at the Building Simulation Applications, , 2015-February 407-414.
130. Jenkins, D., & Newborough, M. (2007). An approach for estimating the carbon emissions associated with office lighting with a daylight contribution. *Applied Energy*, 84(6), 608-622. doi:10.1016/j.apenergy.2007.02.002
131. Ladan G. (2018). Daylight and energy simulation workflow in performance-based building simulation tools. *Building Performance Analysis Conference and SimBuild*, 382-389.
132. Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America*, 3(1), 7-31. doi:10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001
133. Salakij, S., Yu, N., Paolucci, S., & Antsaklis, P. (2016). Model-based predictive control for building energy management. I: Energy modeling and optimal control. *Energy and Buildings*, 133, 345-358. doi:10.1016/j.enbuild.2016.09.044
134. Spiridigliozzi, G., De Santoli, L., Cornaro, C., Basso, G. L., & Barati, S. (2019). BIM tools interoperability for designing energy-efficient buildings. Paper presented at the AIP Conference Proceedings, , 2191 doi:10.1063/1.5138873
135. Spiridigliozzi, G., Pompei, L., Cornaro, C., Santoli, L. D., & Bisegna, F. (2019). BIM-BEM support tools for early stages of zero-energy building design. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, , 609(7) doi:10.1088/1757-899X/609/7/072075
136. Al-Sehrawy, R., & Kumar, B. (2021). Digital twins in architecture, engineering, construction and operations. A brief review and analysis doi:10.1007/978-3-030-51295-8_64
137. Howard, D. A., Ma, Z., & Jørgensen, B. N. (2021). Digital twin framework for energy efficient greenhouse industry 4.0 doi:10.1007/978-3-030-58356-9_34
138. Petrova-Antonova, D., & Ilieva, S. (2021). Digital twin modeling of smart cities doi:10.1007/978-3-030-55307-4_58
139. Errandonea, I., Beltrán, S., & Arrizabalaga, S. (2020). Digital twin for maintenance: A literature review. *Computers in Industry*, 123 doi:10.1016/j.compind.2020.103316
140. O'Dwyer, E., Pan, I., Charlesworth, R., Butler, S., & Shah, N. (2020). Integration of an energy management tool and digital twin for coordination and control of multi-vector smart energy systems. *Sustainable Cities and Society*, 62 doi:10.1016/j.scs.2020.102412
141. Ghita, M., Siham, B., Hicham, M., Abdelhafid, A. E. M., & Laurent, D. (2020). Geospatial business intelligence and cloud services for context aware digital twins development. Paper presented at the Proceedings - 2020 IEEE International Conference of Moroccan Geomatics, MORGEO 2020, doi:10.1109/Morgeo49228.2020.9121889
142. Thisse, J. -. (2014). The new science of cities by michael batty: The opinion of an economist. *Journal of Economic Literature*, 52(3), 805-819. doi:10.1257/jel.52.3.805
143. Yamu, C. (2015). It is Simply Complex(ity). Modelling and simulation in the light of decision-making, emergent structures and a world of non-linearity. *DISP* 50(4):43-53. DOI: 10.1080/02513625.2014.1007662
144. De Roo, G., & Silva, E. A. (2010). A planner's encounter with complexity. *A planner's encounter with complexity* (pp. 1-337)
145. Neirotti, P., De Marco, A., Cagliano, A. C., Mangano, G., & Scorrano, F. (2014). Current trends in smart city initiatives: Some stylised facts. *Cities*, 38, 25-36. doi:10.1016/j.cities.2013.12.010
146. Shapiro, J. M. (2006). Smart cities: Quality of life, productivity, and the growth effects of human capital. *Review of Economics and Statistics*, 88(2), 324-335. doi:10.1162/rest.88.2.324
147. Glaeser, E. L., & Gottlieb, J. D. (2006). Urban resurgence and the consumer city. *Urban Studies*, 43(8), 1275-1299. doi:10.1080/00420980600775683
148. Florida, R. (2002). Bohemia and economic geography. *Journal of Economic Geography*, 2(1), 55-71. doi:10.1093/jeg/2.1.55
149. Bakici, T., Almirall, E., & Wareham, J. (2013). A smart city initiative: The case of barcelona. *Journal of the Knowledge Economy*, 4(2), 135-148. doi:10.1007/s13132-012-0084-9
150. D'Auria, A., Tregua, M., & Vallejo-Martos, M. C. (2018). Modern conceptions of cities as smart and sustainable and their commonalities. *Sustainability (Switzerland)*, 10(8) doi:10.3390/su10082642
151. Nam, T., & Pardo, T. A. (2011). Conceptualizing smart city with dimensions of technology, people, and institutions. Paper presented at the ACM International Conference Proceeding Series, 282-291. doi:10.1145/2037556.2037602
152. Cirillo, F., Gómez, D., Diez, L., EliceGUI Maestro, I., Gilbert, T. B. J., & Akhavan, R. (2020). Smart city IoT services creation through large-scale collaboration. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(6), 5267-5275. doi:10.1109/JIOT.2020.2978770

153. Harrison, C.; Donnelly, I.A. (2011). A theory of smart cities. In Proceedings of the 55th Annual Meeting of the International Society for the System Sciences, p. 15
154. Hijazi, I. H., Krauth, T., Donaubaauer, A., & Kolbe, T. (2020). 3DCITYDB4BIM: A system architecture for linking bim server and 3d citydb for bim-gis-integration. Paper presented at the ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, , 5(4) 195-202. doi:10.5194/isprs-Annals-V-4-2020-195-2020
155. Xu, Z., Zhang, L., Li, H., Lin, Y. -, & Yin, S. (2020). Combining IFC and 3D tiles to create 3D visualization for building information modeling. Automation in Construction, 109 doi:10.1016/j.autcon.2019.102995
156. Cecchini, C., Magrini, A., & Gobbi, L. (2019). A 3d platform for energy data visualization of building assets. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, , 296(1) doi:10.1088/1755-1315/296/1/012035
157. Dembski, F., Wössner, U., Letzgs, M., Ruddat, M., & Yamu, C. (2020). Urban digital twins for smart cities and citizens: The case study of herrenberg, germany. Sustainability (Switzerland), 12(6) doi:10.3390/su12062307
158. Web site - <https://www.ogc.org/> Available in September 2020
159. Kemec , S., Duzgun, H. S., Zlatanova, S. (2009). A conceptual framework for 3d visualisation to support urban disaster management.
160. Dincer, I., Acar, C. Smart energy systems for a sustainable future. Applied Energy 2016, 194. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.12.058
161. Dincer, I., & Zamfirescu, C. (2012). Potential options to greenize energy systems. Energy, 46(1), 5-15. doi:10.1016/j.energy.2011.11.061
162. Web site - National Inventory Report 2020: Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2018 <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/national-inventory-report/view> Available at September 2020
163. De Santoli, L., Basso, G. L., Garcia, D. A., Piras, G., & Spiridigliozzi, G. (2019). Dynamic simulation model of trans-critical carbon dioxide heat pump application for boosting low temperature distribution networks in dwellings. Energies, 12(3) doi:10.3390/en12030484
164. Deng, S., Wang, R.Z., Dai, Y.J. (2014). How to evaluate performance of net zero energy building—A literature research. Energy, 71, 1–16. doi:10.1016/j.energy.2014.05.007.
165. Braulio-Gonzalo, M., & Bovea, M. D. (2017). Environmental and cost performance of building's envelope insulation materials to reduce energy demand: Thickness optimisation. Energy and Buildings, 150, 527-545. doi:10.1016/j.enbuild.2017.06.005
166. Del Amo, A., Martínez-Gracia, A., Bayod-Rújula, A. A., & Antoñanzas, J. (2017). An innovative urban energy system constituted by a photovoltaic/thermal hybrid solar installation: Design, simulation and monitoring. Applied Energy, 186, 140-151. doi:10.1016/j.apenergy.2016.07.011
167. Castellani, B., Gambelli, A.M., Morini, E., Nastasi, B., Presciutti, A., Filipponi, M., Nicolini, A., Rossi, F. (2017). Experimental Investigation on CO2 Methanation Process for Solar Energy Storage Compared to COc-Based Methanol Synthesis. Energies, 10, 855. doi:10.3390/en10070855.
168. Noussan, M., Nastasi, B. (2018). Data Analysis of Heating Systems for Buildings-A Tool for Energy Planning, Policies and Systems Simulation. Energies, 11, doi:10.3390/en11010233.
169. Rosa, F., Carbonara, E. (2017). An analysis on technological plant retrofitting on the masonry behaviour structures of 19th century traditional historical buildings (THB) in Rome. Energy Procedia, 133, 121–134. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.378.
170. Albo, A., Rosa, F., Tiberi, M., Vivio, B. (2014). High-efficiency and low-environmental impact systems on a historical building in Rome: An InWall solution. WIT Transactions on the Built Environment, 142, 529–540. doi:10.2495/ARC140451.
171. Groppi, D., de Santoli, L., Cumo, F., Astiaso Garcia, D. (2018). A GIS-based model to assess buildings energy consumption and usable solar energy potential in urban areas. Sustainable Cities and Society, 40, 546–558. doi:10.1016/j.scs.2018.05.005.
172. Lo Basso, G., Rosa, F., Astiaso Garcia, D., Cumo, F. (2018). Hybrid systems adoption for lowering historic buildings PFEC (primary fossil energy consumption)—A comparative energy analysis. Renewable Energy, 117, 414–433. doi:10.1016/j.renene.2017.10.099.
173. Groppi, D., Astiaso Garcia, D., Lo Basso, G., Cumo, F., De Santoli, L. (2018). Analysing economic and environmental sustainability related to the use of battery and hydrogen energy storages for increasing the energy independence of small islands. Energy Conversion and Management, 177, 64–76. doi:10.1016/j.enconman.2018.09.063.
174. Dominković, D.F., Bačeković, I., Sveinbjörnsson, D., Pedersen, A.S., Krajačić, G. (2017). On the way towards smart energy supply in cities: The impact of interconnecting geographically distributed district heating grids on the energy system. Energy, 137, 941–960.
175. Dominković, D.F., Bin Abdul Rashid, K.A., Romagnoli, A., Pedersen, A.S., Leong, K.C., Krajačić, G., Duić, N. (2017). Potential of district cooling in hot and humid climates. Applied Energy, 208, 49–61. doi:10.1016/j.apenergy.2017.09.052.

176. Becchio, C., Dabbene, P., Fabrizio, E., Monetti, V., Filippi, M. (2015). Cost optimality assessment of a single family house: Building and technical systems solutions for the nZEB target. *Energy and Building*, 90, 173–187. doi:10.1016/j.enbuild.2014.12.050.
177. Nastasi, B., Di Matteo, U. Innovative use of Hydrogen in energy retrofitting of listed buildings. (2017). *Energy Procedia*, 111, 435–441. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.205.
178. Bourrelle, J.S., Andresen, I., Gustavsen, A. (2013). Energy payback: An attributional and environmentally focused approach to energy balance in net zero energy buildings. *Energy and Building*, 65, 84–92. doi:10.1016/j.enbuild.2013.05.038.
179. Zhao, Y., Lu, Y., Yan, C.; Wang, S. (2015). MPC-based optimal scheduling of grid-connected low energy buildings with thermal energy storages. *Energy and Building*, 86, 415–426. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.019.
180. Mitra, S., Sun, L., Grossmann, I.E. (2013). Optimal scheduling of industrial combined heat and power plants under time-sensitive electricity prices. *Energy*, 54, 194–211. doi:10.1016/j.energy.2013.02.030.
181. Al-Sharafi, A., Yilbas, B.S., Sahin A.Z., Ayar, T. (2017). Performance assessment of hybrid power generation systems: Economic and environmental impacts. *Energy Conversion and Management*, 132, 418–431. doi:10.1016/j.enconman.2016.11.047.
182. Levihn, F. (2017). CHP and heat pumps to balance renewable power production: Lessons from the district heating network in Stockholm. *Energy*, 137, 670–678. doi:10.1016/j.energy.2017.01.118.
183. Aprea, C., Maiorino, A. (2008). An experimental evaluation of the transcritical CO₂ refrigerator performances using an internal heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 1006–1011. doi:10.1016/j.ijrefrig.2007.12.016.
184. Cabello, R., Sanchez, D., Llopis, R., Torrella, E. (2008). Experimental evaluation of the energy efficiency of a CO₂ refrigerating plant working in transcritical conditions. *Applied Thermal Engineering*, 1596–1604.
185. Cavallini, A., Cecchinato, L., Corradi, M., Fornasieri, E., Zilio, C. (2008). Two-stage transcritical carbon dioxide cycle optimisation: A theoretical and experimental analysis. *International Journal of Refrigeration*, 28, 1274–1283. doi:10.1016/j.ijrefrig.2005.09.004.
186. Cecchinato, L., Corradi, M., Fornasieri, E., Zamboni, L. (2005). Carbon dioxide as refrigerant for tap water heat pumps: A comparison with the traditional solution. *International Journal of Refrigeration*, 28, 1250–1258. doi:10.1016/j.ijrefrig.2005.05.019.
187. Cho, H., Lee, M.Y., Kim, Y. (2009). Numerical evaluation on the performance of advanced CO₂ cycles in the cooling mode operation. *Applied Thermal Engineering*, 29, 1485–1492, doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.06.030.
188. Kauf, F. (1999). Determination of the optimum high pressure for transcritical CO₂ refrigeration cycle. *International Journal of Thermal Sciences*, 38, 325–330.
189. Kim, M.H., Pettersen, J., Bullard, C.W. (2004). Fundamental process and system design issues in CO₂ vapor compression systems. *Progress in Energy Combustion Science*, 30, 119–174, doi:10.1016/j.peccs.2003.09.002.
190. Liao, S.M., Zhao, T.S., Jakobsen, A. (2000). A correlation of optimal heat rejection pressures in transcritical carbon dioxide cycles. *Applied Thermal Engineering*, 20, 831–841.
191. Wang, H., Maa, Y., Tian, T., Li, M. (2011). Theoretical analysis and experimental research on transcritical CO₂ two stage compression cycle with two gas coolers (TSCC + TG) and the cycle with intercooler (TSCC + IC). *Energy Conversion and Management*, 52, 2819–2828. doi:10.1016/j.enconman.2011.02.003.
192. Kim, S.C., Kim, M.S., Hwang, I.C., Lim, T.W. (2007). Heating performance enhancement of a CO₂ heat pump system recovering stack exhaust thermal energy in fuel cell vehicles. *International Journal of Refrigeration*, 1215–1226. doi:10.1016/j.ijrefrig.2007.02.002.
193. Scoccia, R., Toppi, T., Aprile, M., Motta, M. (2018). Absorption and compression heat pump systems for space heating and DHW in European buildings: Energy, environmental and economic analysis. *Journal of Building Engineering*, 16, 94–105. doi:10.1016/j.jobbe.2017.12.006.
194. Lan Yang, J., Tai Ma, Y., Li, M.X., Hua, J. (2010). Modeling and simulating the transcritical CO₂ heat pump system. *Energy*, 35, 4812–4818. doi:10.1016/j.energy.2010.09.007.
195. Lund, H., AlbergØstergaard, P., VadMathiesen, B. (2010). Smart energy and smart energy systems. *Energy*, 137, 556–565. doi:10.1016/j.energy.2017.05.123.
196. Sarkar, J., Bhattacharyya, S., Gopal, M.S. (2007). Natural refrigerant-based subcritical and transcritical cycles for high temperature heating. *International Journal of Refrigeration*, 30, 3–10. doi:10.1016/j.ijrefrig.2006.03.008.
197. Hepbasli, A., Kalinci, Y. (2009). A review of heat pump water heating systems. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 13, 1211–1229. doi:10.1016/j.rser.2008.08.002.
198. Xie, Y., Wang, Z., Cui, K., Zhang, X. (2011). The Exergy Analysis of Gas Cooler In CO₂ Heat Pump System. *Procedia Environmental Science*, 11, 1555–1560. doi:10.1016/j.proenv.2011.12.234.
199. Web site - CO₂ As Refrigerant: The Transcritical Cycle. Available online: <https://www.achrnews.com/articles/94092-co2-as-refrigerant-the-transcritical-cycle> (accessed on 15 November 2018).

200. Sarkar, J., Bhattacharyya, S., Gopal, M.R. (2004). Optimization of a transcritical CO₂ heat pump cycle for simultaneous cooling and heating applications. *International Journal of Refrigeration*, 830–838, doi:10.1016/j.ijrefrig.2004.03.006.
201. Web site - Evoplus-B 120/220.32 M product specifications. Available online: <https://www.dabpumps.com/it/evoplus-small> (accessed on 15 November 2018).
202. Oliveira Panão, M.J.N. (2016). The overall renewable energy fraction: An alternative performance indicator for evaluating Net Zero Energy Buildings. *Energy and Buildings*, 127, 736–774, 10.1016/j.enbuild.2016.06.057.
203. Desideri, U., Proietti, S., Arcioni, L., Leonardi, D., Sdringola, P. (2007). Comparative analysis of three methodologies for the energy certification applied to residential buildings, developed in Italy in conformity with European directive EPBD 2002/91. In *Proceedings of the ECOS 2007—Proceedings of the 20th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Padua, Italy, 25–28 June 2007; p. 1495.
204. Park, S. -, & Kim, E. (2016). Middleware for translating urban GIS information for building a design society via general BIM tools. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 15(3), 447-454. doi:10.3130/jaabe.15.447
205. De Hoogh, S., Di Giulio, R., Quentin, C., Turillazzi, B., & Sebastian, R. (2015). Hospital campus design related with EeB challenges. Paper presented at the *EWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction - Proceedings of the 10th European Conference on Product and Process Modelling, ECPPM 2014*, 907-913. doi:10.1201/b17396-144
206. Niu, S., Pan, W., & Zhao, Y. (2015). A BIM-GIS integrated web-based visualization system for low energy building design. Paper presented at the *Procedia Engineering*, 121 2184-2192. doi:10.1016/j.proeng.2015.09.091
207. Wang, J., Hou, L., Chong, H. -, Liu, X., Wang, X., & Guo, J. (2014). A cooperative system of GIS and BIM for traffic planning: A high-rise building case study doi:10.1007/978-3-319-10831-5_20
208. Sergi, D. M., & Li, J. (2014). Applications of GIS-enhanced networks of engineering information doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.444-445.1672
209. Deng, Y., Cheng, J. C. P., & Anumba, C. (2016). A framework for 3D traffic noise mapping using data from BIM and GIS integration. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(10), 1267-1280. doi:10.1080/15732479.2015.1110603
210. Hjelseth, E., Thiis, T. K. (2008). Use of BIM and GIS to enable climatic adaptations of buildings, *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: ECPPM 2008*: 409.
211. Choi, H.J., Kim, J.H. (2012). A Program Management Information System for Managing Urban Renewals In book: *Advances in Spatial Planning*, DOI: 10.5772/34645
212. Ronzino, A., Osello, A., Patti, E., Bottaccioli, L., Danna, C., Lingua, A., . . . Rasconà, G. (2015). The energy efficiency management at urban scale by means of integrated modelling. Paper presented at the *Energy Procedia* 83 258-268. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.180
213. Belussi, L., Danza, L., Ghellere, M., Guazzi, G., Meroni, I., & Salamone, F. (2017). Estimation of building energy performance for local energy policy at urban scale. Paper presented at the *Energy Procedia*, , 122 98-103. doi:10.1016/j.egypro.2017.07.379
214. Kim, S. A., Shin, D., Choe, Y., Seibert, T., & Walz, S. P. (2012). Integrated energy monitoring and visualization system for smart green city development: Designing a spatial information integrated energy monitoring model in the context of massive data management on a web based platform. *Automation in Construction*, 22, 51-59. doi:10.1016/j.autcon.2011.07.004

ACKNOWLEDGMENTS

This research has been carried out thanks to the “Renovation of existing buildings in NZEB vision (nearly Zero Energy Buildings)” Project of National Interest (Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale - PRIN) funded by the Italian Ministry of Education, Universities and Research (MIUR).

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Schema Workflow della ricerca	8
Figura 2: Livello di definizione degli NZEB negli Stati membri – Fonte Progetto ZEBRA2020 [20]	18
Figura 3: Popolazione al 1 gennaio 2020 – Fonte dati ISTAT	19
Figura 4: Ripartizione dell'area del pavimento dell'edificio – [30].....	20
Figura 5: Ripartizione della superficie per sottosettore non residenziale - [30].....	20
Figura 6: Suddivisione di edifici residenziali per tipologia: plurifamiliare e unifamiliare – 2015 [30].....	21
Figura 7: Percentuale di sistemi di riscaldamento in base alle zone climatiche	22
Figura 8: Ripartizione dei consumi energetici negli edifici residenziali 2017 - [30].....	22
Figura 9: Numero edifici nel contesto italiano	23
Figura 10: Suddivisione edifici Residenziali – Non residenziali	24
Figura 11: Quadro di sintesi dei risparmi attesi nell'anno 2030, per settore (Mtep di energia finale).....	28
Figura 12: Osservatorio degli edifici a energia quasi zero in Italia.....	29
Figura 13: Quota di edifici a energia quasi zero (NZEB) nelle nuove costruzioni per uso residenziale - 2015.....	31
Figura 14: Costo extra per le costruzioni di nZEB rispetto al costo medio di nuove costruzioni [33].....	32
Figura 15: Potenziale di riduzione fino al 2050 dei costi delle principali tecnologie Nzeb: Fonte CRAVEzero [28].....	32
Figura 16: Grafico sui Livelli BIM di Mark Bew [61].....	37
Figura 17: Schema dei flussi tradizionali	40
Figura 18: Schema dei flussi integrati.....	40
Figura 19: La gestione, il coordinamento e la modellazione dei flussi informativi.....	41
Figura 20: Le principali parti della norma UNI11337	42
Figura 21: Schema rappresentativo del livello di sviluppo del BIM	44
Figura 22: Le dimensioni del BIM	46

Figura 23: I paradigmi del progresso digitalizzato.....	47
Figura 24: La gestione dei dati Cloud	48
Figura 25: Lo sviluppo della normativa dell'IFC.....	53
Figura 26: Suddivisione di alcuni strumenti di simulazione energetica	55
Figura 27: Workflow rappresentativo dei casi studio affrontati nella ricerca	56
Figura 28: Mappa del procedimento per il singolo caso studio	57
Figura 29: Workflow applicato ai BESTEST Caso 1	59
Figura 30: BESTEST 900-910-920-930.....	61
Figura 31: Workflow di utilizzo di Autodesk Dynamo	62
Figura 32: Estratto del file IFC	64
Figura 33: Workflow applicato ai BESTEST Caso 2	68
Figura 34: BESTEST Case 900-910-920-930	70
Figura 35: Esportazione Spazi (a), Esportazione modello energetico (b).....	72
Figura 36: Caso 900 importato: DA (300 lx) risultati	73
Figura 37: Caso 920 importato: DA (300 lx) risultati	75
Figura 38: Workflow applicato al caso semplice Caso 3.....	79
Figura 39: Risultati energetici dal file IFC	82
Figura 40: Comparazione tra le simulazioni energetiche provenienti dal file IFC e quelle create dal modello IDA-ICE.....	83
Figura 41: Il punto di incontro tra il BIM e il GIS (l'edificio)	89
Figura 42:Workflow di condivisione Cloud.....	93
Figura 43: I Livelli di Dettagli (LOD) definiti dal CityGML (Source: IKG Uni Bonn)	95
Figura 44:Le sScale di riferimento per l'integrazione BIM-GIS.....	97
Figura 45:Workflow del processo di trasmissione al WebClient.....	98
Figura 46: Modello Revit Villetta	99
Figura 47: Formati di interscambio di FME	100
Figura 48: Interfaccia di lavoro di FME Software	101
Figura 49: Impostazione sistema di coordinate	101
Figura 50: Interfaccia Data Inspector di FME	102
Figura 51: Configurazione 3DCityDB	104

Figura 52: Connessione al database pdAdmin	104
Figura 53: Delimitazione degli edifici e lettura delle coordinate	105
Figura 54: Interfaccia database pdAdmin	105
Figura 55: SPSHG Plug-in	106
Figura 56: Collegamento al localhost8000	106
Figura 57: Interfaccia del WebClient basato su Cesium.....	107
Figura 58: Importazione del caso studio	107
Figura 59: Connessione al database pdAdmin	108
Figura 60: Connessione al database pdAdmin	108
Figura 61: Visualizzazione nel Web-Client del caso studio delle quattro villette	110
Figura 62: Visualizzazione nel Web-Client del caso studio dei quattro BESTEST.....	110
Figura 63: Futuri sviluppi : Esempio di applicazione virtualcitySUITE a partire da 3DCityDB.....	112
Figura 64: Obiettivi per un futuro sostenibile	114
Figura 65: Flusso di lavoro per il modello energetico in MATLAB.....	122
Figura 66: Pianta del lotto residenziale	123
Figura 67: Livelli dell'edificio: (a) pianta piano terra e (b) pianta piano interrato.....	123
Figura 68: Layout del sistema ibrido di energia	125
Figura 69: (a) Diagramma P-h del refrigerante [R744] e (b) diagramma T-S (A: Ingresso refrigeratore; B: Ingresso scambiatore; C: valvola; D: Ingresso evaporatore; E: Ingresso scambiatore; F: Ingresso compressore).	127
Figura 70: Layout interno della pompa di calore.	128
Figura 71:(a) Diametro tubi; D = Diametro esterno tubi; di = Diametro interno tubi; De = Diametro membrata resistente; d ins = diametro isolante esterno, (b) posizione dei tubi interrati.....	133
Figura 72: Domanda elettrica ed elettricità in eccesso (in rosso l'energia richiesta in un anno, in verde l'energia prodotta)	134
Figura 73: Carichi elettrici e produzione di elettricità da fotovoltaico	135
Figura 74: Energia totale prodotta dal sistema ibrido (a) e dal sistema tradizionale (b)	135

Figura 75: Valori dell'indicatore di prestazione con variazioni dei carichi elettrici dell'edificio	137
Figura 76: Valori dell'indicatore di prestazione con variazioni dei carichi termici dell'edificio	137
Figura 77: Analisi di sensibilità su eccesso elettrico con variazioni del PTHR normalizzato, aumento del carico elettrico (a) e del carico termico (b).....	139
Figura 78: Analisi di sensibilità sugli indicatori di prestazione con variazioni dei carichi termici quando è collegato un banco di batterie	139
Figura 79: Analisi di sensitività sugli indicatori di prestazione con variazioni dei carichi elettrici, quando è collegato un banco di batterie.....	140
Figura 80: Il fabbisogno di energia fossile primaria di un edificio normalizzato in un anno (a), il fabbisogno di energia fossile primaria di un edificio normalizzato in un anno trascurando il contributo di elettricità (b).....	140