



Politecnico di Bari

Repository Istituzionale dei Prodotti della Ricerca del Politecnico di Bari

Metodologia per l'analisi energetica di contesti edilizi = Methodology for the energy analysis of building contexts

This is a PhD Thesis

Original Citation:

Metodologia per l'analisi energetica di contesti edilizi = Methodology for the energy analysis of building contexts / Chieppa, Riccardo. - ELETTRONICO. - (2024). [10.60576/poliba/iris/chieppa-riccardo_phd2024]

Availability:

This version is available at <http://hdl.handle.net/11589/267008> since: 2024-03-08

Published version

Politecnico di Bari
<http://hdl.handle.net/11589/267008>
DOI: 10.60576/poliba/iris/chieppa-riccardo_phd2024

Terms of use:

Altro tipo di accesso

(Article begins on next page)



POLITECNICO DI BARI

07

2023

DICATECH

D.R.R.S.

2023

Doctor of Philosophy in Environmental and Building Risk and Development

Coordinator: Prof. Michele Mossa

XXXV CYCLE
ICAR/10

DICATECh

Department of Civil, Environmental, Building Engineering and Chemistry

Riccardo Chieppa

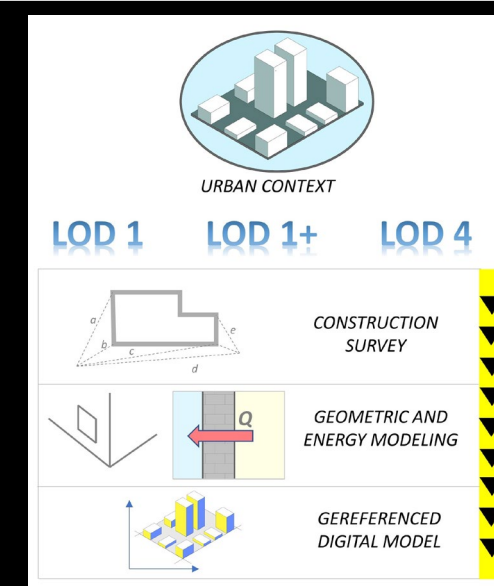
Riccardo Chieppa

Methodology for the energy analysis of building contexts

Prof. Guido Raffaele Dell'Osso
Department of Civil, Environmental, Building Engineering and Chemistry, Polytechnic University of Bari

Prof. Francesco Iannone
Department of Civil, Environmental, Building Engineering and Chemistry, Polytechnic University of Bari

Methodology for the energy analysis of building contexts



Cover image:
representation of the developed methodology

07



POLITECNICO DI BARI

D.R.R.S

07

Doctor of Philosophy in Environmental and Building Risk and Development

2023

Coordinator: Prof. Michele Mossa

XXXV CYCLE
ICAR/10

DICATECh

Department of Civil, Environmental, Building Engineering and Chemistry

Methodology for the energy analysis of building contexts

Prof. Guido Raffaele Dell'Osso
Department of Civil, Environmental, Building Engineering and Chemistry, Polytechnic University of Bari

Prof. Francesco Iannone
Department of Civil, Environmental, Building Engineering and Chemistry, Polytechnic University of Bari

Riccardo Chieppa



D.R.R.S

POLITECNICO DI BARI

07

Dottorato di Ricerca in Rischio e Sviluppo
ambientale, territoriale ed edilizio

2023

Coordinatore: Prof. Michele Mossa

XXXV CICLO
ICAR/10

DICATECH

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale,
del Territorio, Edile e di Chimica

**Metodologia per l'analisi energetica
di contesti edilizi**

Prof. Guido Raffaele Dell'Osso
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e
di Chimica, Università Politecnico di Bari

Prof. Francesco Iannone
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e
di Chimica, Università Politecnico di Bari

Riccardo Chieppa

Il sottoscritto Chieppa Riccardo nato a Terlizzi il 24/05/1994 residente a Andria in via G.A. Canal n.52 e-mail riccardo.chieppa@poliba.it iscritto al 3° anno di Corso di Dottorato di Ricerca in Rischio, Sviluppo Ambientale, Territoriale ed Edilizio ciclo XXXV° ed essendo stato ammesso a sostenere l'esame finale con la prevista discussione della tesi dal titolo:

Metodologia per l'analisi energetica di contesti edilizi

DICHIARA

- 1) di essere consapevole che, ai sensi del D.P.R. n. 445 del 28.12.2000, le dichiarazioni mendaci, la falsità negli atti e l'uso di atti falsi sono puniti ai sensi del codice penale e delle Leggi speciali in materia, e che nel caso ricorressero dette ipotesi, decade fin dall'inizio e senza necessità di nessuna formalità dai benefici conseguenti al provvedimento emanato sulla base di tali dichiarazioni;
- 2) di essere iscritto al Corso di Dottorato di ricerca Rischio, Sviluppo Ambientale, Territoriale ed Edilizio ciclo XXXV°, corso attivato ai sensi del "Regolamento dei Corsi di Dottorato di ricerca del Politecnico di Bari", emanato con D.R. n.286 del 01.07.2013;
- 3) di essere pienamente a conoscenza delle disposizioni contenute nel predetto Regolamento in merito alla procedura di deposito, pubblicazione e autoarchiviazione della tesi di dottorato nell'Archivio Istituzionale ad accesso aperto alla letteratura scientifica;
- 4) di essere consapevole che attraverso l'autoarchiviazione delle tesi nell'Archivio Istituzionale ad accesso aperto alla letteratura scientifica del Politecnico di Bari (IRIS-POLIBA), l'Ateneo archiverà e renderà consultabile in rete (nel rispetto della Policy di Ateneo di cui al D.R. 642 del 13.11.2015) il testo completo della tesi di dottorato, fatta salva la possibilità di sottoscrizione di apposite licenze per le relative condizioni di utilizzo (di cui al sito <http://www.creativecommons.it/Licenze>), e fatte salve, altresì, le eventuali esigenze di "embargo", legate a strette considerazioni sulla tutelabilità e sfruttamento industriale/commerciale dei contenuti della tesi, da rappresentarsi mediante compilazione e sottoscrizione del modulo in calce (Richiesta di embargo);
- 5) che la tesi da depositare in IRIS-POLIBA, in formato digitale (PDF/A) sarà del tutto identica a quelle consegnate/inviolate/inviarsi ai componenti della commissione per l'esame finale e a qualsiasi altra copia depositata presso gli Uffici del Politecnico di Bari in forma cartacea o digitale, ovvero a quella da discutere in sede di esame finale, a quella da depositare, a cura dell'Ateneo, presso le Biblioteche Nazionali Centrali di Roma e Firenze e presso tutti gli Uffici competenti per legge al momento del deposito stesso, e che di conseguenza va esclusa qualsiasi responsabilità del Politecnico di Bari per quanto riguarda eventuali errori, imprecisioni o omissioni nei contenuti della tesi;
- 6) che il contenuto e l'organizzazione della tesi è opera originale realizzata dal sottoscritto e non compromette in alcun modo i diritti di terzi, ivi compresi quelli relativi alla sicurezza dei dati personali; che pertanto il Politecnico di Bari ed i suoi funzionari sono in ogni caso esenti da responsabilità di qualsivoglia natura: civile, amministrativa e penale e saranno dal sottoscritto tenuti indenni da qualsiasi richiesta o rivendicazione da parte di terzi;
- 7) che il contenuto della tesi non infrange in alcun modo il diritto d'Autore né gli obblighi connessi alla salvaguardia di diritti morali ed economici di altri autori o di altri aventi diritto, sia per testi, immagini, foto, tabelle, o altre parti di cui la tesi è composta.

BARI,05/03/2024

Firma



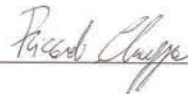
Il sottoscritto, con l'autoarchiviazione della propria tesi di dottorato nell'Archivio Istituzionale ad accesso aperto del Politecnico di Bari (POLIBA-IRIS), pur mantenendo su di essa tutti i diritti d'autore, morali ed economici, ai sensi della normativa vigente (Legge 633/1941 e ss.mm.ii.),

CONCEDE

- al Politecnico di Bari il permesso di trasferire l'opera su qualsiasi supporto e di convertirla in qualsiasi formato al fine di una corretta conservazione nel tempo. Il Politecnico di Bari garantisce che non verrà effettuata alcuna modifica al contenuto e alla struttura dell'opera.
- al Politecnico di Bari la possibilità di riprodurre l'opera in più di una copia per fini di sicurezza, back-up e conservazione.

BARI,05/03/2024

Firma



EXTENDED ABSTRACT (ENG)

The fight against climate change, the reduction of greenhouse gas emissions into the atmosphere and the lower consumption deriving from non-renewable sources see cities as important places in which to implement targeted policies to help achieve carbon neutrality objectives. In fact, urban agglomerations are responsible for a significant part of the planet's energy resource consumption. In order to study the energy performance of large areas such as neighborhoods and cities, scientific research has developed the Urban Energy Simulation Models - UESM designed to study energy consumption at the urban scale and evaluate the effectiveness of efficiency strategies.

The objective of this work is the development of a methodology which, starting from the analysis of the urban contexts performed with different approaches depending on the desired level of detail, passing through the energy modeling phase, arrives at the construction of a georeferenced digital model in which to summarize the characteristics of the buildings through status indicators. The areas of interest coincide with predominantly residential neighborhoods or urban networks created between the II Post War and 1990, or areas that perform poorly from an energy point of view.

The proposed methodology was designed with three different levels of development corresponding to LOD1, LOD4 and LOD1+, designed with different applicabilities and with an input data structure necessary for the calculation which is new in the scientific panorama, in particular with respect to non-geometric data. The LOD1 is designed for more simplified analyzes in which the constructions are represented as closed prismatic solids and the data collection activity takes place

exclusively with techniques based on statistics or existing databases. The LOD4 is designed to conduct analyzes with a high level of detail in the representation of built objects, based on the double-camera photogrammetric survey (one RGB and the other thermographic) capable of characterizing the buildings from a thermophysical point of view starting from the double point cloud constructed; data collection at this level of detail involves the use of documentary analyses. This is followed by the construction phase of the BIM model and dynamic energy modeling implemented in Energy+. The LOD1+ is an improved version of the LOD1 (not foreseen in the CityGML standard not even with reference to the geometric aspects of the buildings) and involves the use of photogrammetric survey for an accurate representation of the building, for the estimate of the envelope performance and for the calculation of the ratio of windowed surfaces to opaque surfaces. Both LOD1+ and LOD1 involve the adoption of the simplified 5 resistance and 1 capacitance energy model described in ISO 13790.

The developed methodology supports the analysis and planning activities of energy retrofit interventions through assessments based on different intervention scenarios.

In this work, two case study applications were conducted, the first aimed at conducting reliability tests of the double-camera survey technique to conduct an assessment of the accuracy of the results obtained with respect to the geometric aspects and to estimate the thermal transmittance of the buildings. In the second case study there was an application of the methodology on an urban area and the validation took place through comparison between the simulated and measured energy consumption data.

The methodology presented here is designed as a decision support tool that can be adopted by public or private building stock management companies.

Keywords

UESM, urban, energy, GeoBIM, LODs

EXTENDED ABSTRACT (ITA)

Il contrasto al cambiamento climatico, la riduzione delle emissioni di gas serra in atmosfera e la diminuzione dei consumi derivanti da fonti non rinnovabili, vedono le città come luoghi importanti su cui attuare politiche mirate per favorire il raggiungimento degli obiettivi di carbon neutrality. Gli agglomerati urbani, infatti, sono responsabili di una parte significativa dei consumi di risorse energetiche del pianeta. Allo scopo di studiare le performance energetiche di aree ampie come quartieri e città, la ricerca scientifica ha sviluppato gli Urban Energy Simulation Models - UESM ideati per studiare i consumi energetici alla scala urbana e valutare l'efficacia delle strategie di efficientamento.

L'obiettivo del presente lavoro è la messa a punto di una metodologia che, partendo dall'analisi del tessuto edilizio eseguita con differenti approcci a seconda del livello di dettaglio desiderato, passando per la fase di modellazione energetica, giunge alla costruzione di un modello digitale georeferenziato nel quale riportare attraverso degli indicatori di stato le caratteristiche degli edifici. Gli ambiti di interesse sono coincidenti con quartieri o maglie urbane a prevalenza residenziale realizzati tra il Secondo Dopoguerra e il 1990 ovvero aree scarsamente performanti dal punto di vista energetico.

La metodologia proposta è stata ideata con tre diversi livelli di sviluppo corrispondenti ai LOD1, LOD4 e LOD1+, ideati con applicabilità diverse tra loro e con una struttura dati di input necessari al calcolo che è nuova nel panorama scientifico in particolare rispetto ai dati non geometrici necessari per la modellazione (tecnologia costruttiva, impianti, occupazione ed uso degli spazi, ventilazione naturale).

Il LOD1 è pensato per le analisi più semplificate in cui le costruzioni sono rappresentate come solidi prismatici chiusi e l'attività di raccolta dati avviene esclusivamente con tecniche basate sulla statistica o su database esistenti. Il LOD4 è ideato per condurre analisi con un livello di dettaglio elevato nella rappresentazione degli oggetti costruiti, basato sul rilievo fotogrammetrico a doppia camera (una RGB e l'altra termografica) in grado di caratterizzare gli edifici dal punto di vista termofisico a partire dalla doppia nuvola di punti costruita; la raccolta dati a questo livello di dettaglio prevede l'impiego di analisi documentali. Segue la fase di costruzione del modello BIM e di modellazione energetica in regime dinamico. Il LOD1+ è una versione migliorata del LOD1 (non prevista nello standard CityGML nemmeno con riferimento agli aspetti geometrici del costruito) e prevede l'impiego del rilievo fotogrammetrico per una accurata rappresentazione del costruito, per la stima delle performance di involucro e per il calcolo del rapporto superfici finestrate su superfici opache. Sia il LOD1+ che il LOD1 prevedono l'adozione del modello energetico semplificato a 5 resistenze e 1 capacità descritto nella ISO 13790.

La metodologia messa a punto supporta le attività di analisi e pianificazione degli interventi di retrofit energetico attraverso valutazioni basate su diversi scenari di intervento.

Nel presente lavoro si sono condotte due applicazioni su casi studio, la prima finalizzata alla conduzione di test di affidabilità della tecnica di rilievo a doppia camera per condurre una valutazione di accuratezza dei risultati ottenuti rispetto agli aspetti geometrici e per la stima della trasmittanza termica di involucro. Nel secondo caso studio vi è stata una applicazione della metodologia su un'area urbana e la validazione è avvenuta mediante confronto tra i dati di consumo energetico simulato e quelli misurati.

La metodologia qui presentata è ideata come strumento di supporto decisionale adottabile da parte di società pubbliche o private di gestione del patrimonio edilizio.

Keywords

UESM, urban, energy, GeoBIM, LODs

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	7
2. STATO DELL'ARTE.....	16
2.1 Urban Energy Simulation Models	17
2.2 LODs relativi agli UESM	23
2.3 Sistemi per il rilievo esteso alla scala urbana.....	30
2.4 Analisi di sensitività – valutazione degli indicatori più significativi.....	33
2.5 Algoritmi per la ricerca della trasmittanza termica di involucro a partire da riprese termografiche.....	36
2.6 GeoBIM: un approccio integrato alla gestione di dati multiplatforma BIM – GIS.....	40
2.7 Valutazioni sullo stato dell'arte	48
3. METODOLOGIA.....	53
3.1 Inquadramento	53
3.2 Presentazione dei LODs – parte 1	57
3.3 Presentazione dei LODs – parte 2 (LOD1, LOD4 e LOD1 +)	66
3.3.1 LOD1– Matrice di riferimento dati di input.....	68
3.3.1.1 Modello di calcolo LOD1	68
3.3.2 LOD4– Matrice di riferimento dati di input.....	70
3.3.2.1 Rilevo fotogrammetrico combinato e costruzione doppia nuvola di punti	71
3.3.2.2 Analisi della nuvola di punti.....	73
3.3.2.3 Costruzione del modello in ambiente BIM.....	77
3.3.3 LOD 1+ – Matrice di riferimento dati di input.....	78
3.3.3.1 Modello di calcolo LOD 1+	79

3.4 Fase di validazione	79
3.5 Individuazione degli utilizzatori finali della metodologia	80
3.6 Indicatori di stato e scenari di retrofit energetico	80
3.7 Costruzione del modello digitale georeferenziato: applicazione del GeoBIM	82
4. APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA DI RILIEVO – CASO STUDIO 1	85
5. CASO STUDIO 2 – APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA.....	93
5.1 Individuazione ambito urbano	93
5.2 Modellazione al LOD1	95
5.3 Modellazione al LOD4.....	96
5.3.1 Rilievo e costruzione della nuvola di punti	97
5.3.2 Analisi nuvola di punti.....	98
5.3.3 Costruzione del modello BIM	99
5.3.4 Criteri di modellazione energetica in regime dinamico implementata in Energy+: influenza degli aspetti distributivi e di orientamento.....	100
5.4 Modellazione al LOD1+	103
5.5 Analisi dei risultati	103
5.6 Fase di validazione	105
5.7 Costruzione del modello digitale georeferenziato	109
6. CONCLUSIONI	114
7. BIBLIOGRAFIA	118
8. RINGRAZIAMENTI	131
9. ALLEGATI.....	132
10. CURRICULUM VITAE	133

1. INTRODUZIONE

Il tema della sostenibilità ambientale è divenuto negli ultimi anni centrale all'interno delle politiche di sviluppo di gran parte dei paesi. La lotta ai cambiamenti climatici, la crisi economica ed energetica, la povertà diffusa, hanno enfatizzato la necessità di introdurre ed attuare strategie comuni finalizzate alla riduzione degli sprechi e dei consumi in modo da preservare le materie prime naturali da una parte e limitare dall'altra l'emissione di inquinanti in atmosfera, ritenuti causa del surriscaldamento globale [1].

In questo scenario, le politiche di efficientamento energetico sono strumenti efficaci per la riduzione dei consumi e risultano ancora più incisive se applicate alla scala ampia di distretto, di quartiere e di città. Infatti, queste ultime sono ritenute responsabili di gran parte delle emissioni di CO₂ [1].

Le città occupano solo il 3 % della superficie terrestre ma sono responsabili del 60-80 % dei consumi energetici globali e del 75 % delle emissioni di CO₂ [2].

Come riportato nel riferimento [3] il ruolo delle città e del settore delle costruzioni è cruciale per le attuali e future politiche di sviluppo sostenibile infatti:

- la popolazione mondiale urbana raggiungerà entro il 2050 i 6,3 miliardi di abitanti (contro i 3.6 del 2010) con l'incremento più significativo che avverrà nell'area asiatica;
- entro il 2025 ci saranno complessivamente 37 mega-città (attualmente se ne contano 25);
- entro il 2025 si stima che la spesa nel settore delle costruzioni sarà intorno a 15 mila miliardi di dollari annui.

Risulta dunque chiaro il ruolo delle città nello sforzo di mitigare i rischi legati all'eccessivo consumo di risorse e per questo negli ultimi anni sempre più importanza ha assunto la Urban Building Energy Modeling – UBEM [4-5]; si tratta della modellazione complessiva dell'area urbana in cui i singoli modelli degli edifici esistenti vengono messi in relazione tra loro in modo da fornire indicazioni generali dei consumi energetici. Questo tipo di modellazione è possibile in ambiti di diversa

estensione (da pochi edifici ad intere città) e si presta a vari livelli di approfondimento in funzione degli obiettivi di modellazione.

Nell'ambito della UBEM vengono definiti gli Urban Energy Simulation Models – UESM [6-8] (oggetto di approfondimento nella ricerca) che più in particolare descrivono i modelli energetici applicabili e le varie tipologie possibili.

Il principale obiettivo della tesi ha riguardato la strutturazione del quadro conoscitivo e delle metodologie da adottare per l'analisi energetica alla scala urbana (mediante gli UESM) nella logica della modellazione informativa con particolare riguardo alla multi scalarità. Il metodo proposto è stato quindi introdotto all'interno del GeoBIM, non essendo possibile gestire la complessità di una modellazione urbana riferendosi ai soli aspetti energetici; la ricerca introduce cioè una flessibile gestione delle diverse tipologie di dati che sono collegabili in ottica sistemica agli edifici sia singolarmente sia a gruppi. Gli UESM consentono inoltre di analizzare gli edifici presenti nell'ambito urbano, caratterizzarli dal punto di vista termofisico, quindi valutare dapprima i consumi energetici e conseguentemente l'efficacia dell'introduzione delle misure di efficientamento.

La ricerca propone una metodologia di analisi del tessuto edilizio esistente, da applicarsi, a seconda delle finalità, con diversi livelli di dettaglio (Level of Developments - LODs), in grado di caratterizzare dal punto di vista termofisico gli edifici e stimare i consumi energetici (fasi di rilievo e fase di modellazione geometrica ed energetica). La metodologia produce come output finale un modello digitale georeferenziato (ultima fase della metodologia) dell'area indagata, capace di coinvolgere (più in generale) anche aspetti connessi con le complesse dinamiche urbane includendo questioni economiche, sociali e di gestione del patrimonio. In altri termini, questo lavoro apporta un contributo significativo nella formulazione di strumenti complessi che riescano a tenere in conto aspetti tecnico ingegneristici e urbanistici, sociali, politici, oltre che economici. In questo senso la metodologia sviluppata nella ricerca risulta di interesse, a titolo di esempio, per le fasi di pianificazione e studio di fattibilità di comunità energetiche a livello di quartiere al fine di valutare la copertura della domanda elettrica da fotovoltaico (o altri sistemi

alimentati da fonti energetiche rinnovabili - FER) oppure identificare le aree idonee per l'installazione di questi sistemi. La questione delle comunità energetiche, infatti, ha trovato solo più di recente terreno fertile per una più ampia applicazione [9] in seguito anche all'introduzione della prima Direttiva Europea CEP – Clean Energy Package [10] del 2019 e, in ambito nazionale, con la Legge n.8 del 2020 [11]. Un altro possibile campo di applicazione riguarda il tema dell'analisi sociale a livello di quartiere e di contrasto della povertà energetica mediante politiche a scala urbana basate, tra l'altro, su analisi sociali (reddito medio, occupazione, titolo di studio), dei consumi e di interventi per la loro riduzione.

Queste applicazioni della metodologia sono possibili principalmente in ragione dell'approccio della modellazione informativa GeoBIM adottato nella ricerca al fine di costruire il modello digitale georeferenziato dotato dei requisiti di flessibilità intesa nel senso di apertura all'introduzione di qualsiasi tipologia di dato caratterizzante l'ambito urbano e di interoperabilità ovvero di consentire il passaggio o la comunicazione tra dati provenienti da sistemi diversi (BIM o GIS).

Questa ricerca, attraverso una strutturazione in tre diversi LODs ha consentito di diversificare non solo il livello di accuratezza nei risultati di output ma anche di garantire, soprattutto per il LOD1, rapidità di applicazione configurando il metodo come speditivo; la velocità di attuazione si riduce per il LOD1+ e ancora di più per il LOD4, mentre aumenta l'accuratezza dei dati calcolabili prestandosi quest'ultimo a supportare le fasi di validazione della metodologia.

Si precisa, inoltre, che la ricerca ha strutturato una matrice di tutti i dati richiesti, per ciascun LOD, per le finalità di modellazione e analisi energetica urbana; inoltre, per ciascuno dei tipi di dati individuati e associati ai singoli LODs è stato proposto il metodo di rilievo richiamando di volta in volta tecniche di acquisizione, norme tecniche di riferimento o database esistenti. Nella descrizione dei LODs proposta al capitolo 3 sotto forma di matrici, sono individuati tra gli allegati anche un set di possibili valori alfa numerici da attribuire alle singole tipologie di dati; quest'ultima ricognizione è particolarmente utile per l'applicazione della metodologia a casi studio così come meglio esposto nel capitolo 5.

La metodologia in questione è ideata per essere applicata in contesti urbani costruiti in periodi storici caratterizzati da scarsa o assente sensibilità verso le tematiche ambientali e di riduzione dei consumi energetici; come meglio precisato nel seguito gli ambiti di interesse sono quelli costruiti nel periodo tra il Secondo Dopoguerra e i primi anni '90. Lo studio della situazione europea [12] (fig. 1) evidenzia come grandi quantità di edificato (fino al 80 % e oltre a seconda dell'area geografica) siano state costruite prima del 1990.

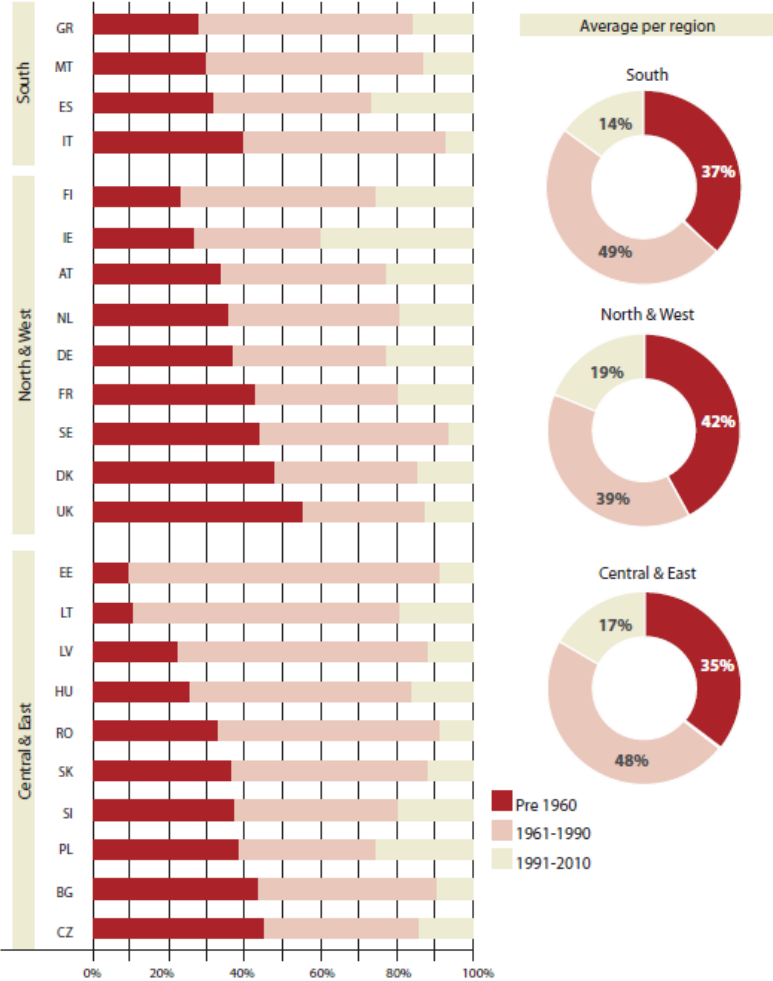


Figura 1 Profili di età dello stock edilizio europeo esistente – (fonte: BPIE 2011)

A questo periodo storico corrisponde in Italia una situazione normativa che nonostante l'introduzione di dispositivi prescrittivi come la Legge 373 del 1976 [13] e la Legge n.10/1991 [14] finalizzati al risparmio energetico nelle costruzioni, ha visto la realizzazione di patrimonio edilizio scarsamente performante dal punto di vista energetico. Certamente tale asserzione è esaltata in uno confronto a posteriori in cui da una parte vi è il progresso tecnologico (si pensi alle tecnologie a cambiamento di fase negli edifici, ai sistemi per la produzione elettrica e termica da fonti rinnovabili, ai sistemi per il recupero di calore, ecc.), dall'altra da strumenti normativi come il D. Lgs n. 28 del 2011 [15] o il Decreto Requisiti Minimi del 2015 [16] (aggiornato nel 2022) che propongono requisiti delle varie unità tecnologiche finalizzati anche alla costruzione di edifici nearly zero energy buildings - N-ZEB; di fatto risulta che il patrimonio edilizio costruito nel periodo antecedente agli anni '90 è sicuramente inquadrabile nel sistema di classificazione energetica come "F" o "G" ovvero a comportamento energetico pessimo sia nell'involucro che negli impianti e bisognoso di azioni di retrofit energetico come risulta dalla direttiva "casa green" [17] della Unione Europea che punta ad efficientare gli edifici esistenti in modo che raggiungano la classe energetica "D" entro il 2033.

Il tema dell'analisi energetica di aree coincidenti con quartieri o città è stato nel tempo affrontato dal legislatore mediante i piani energetici comunali, introdotti per la prima volta con la Legge 10/91 che prescriveva l'adozione nei comuni con popolazione superiore a 50 mila abitanti. Si tratta di strumenti di pianificazione da affiancare ai piani urbanistici generali con gli obiettivi di favorire il risparmio energetico, la riduzione delle emissioni di gas climalteranti, l'uso di fonti rinnovabili e la mobilità sostenibile. Questi piani, tuttavia, analizzano l'intero comune per settori (trasporti, illuminazione, edifici pubblici, impianti industriali) senza soffermarsi sulle costruzioni private che in effetti costituiscono gran parte delle aree edificate. Inoltre, si segnala come questi piani, tuttora non sempre adottati con una situazione eterogenea tra comuni, spesso non prevedono attività di audit energetico sui singoli edifici ma piuttosto si affidano a dati misurati forniti dalle utility dell'energia per trarre indicatori globali.

Il tema dell'analisi energetica alla scala di regione (introdotto anche esso dalla Legge 10/91) è gestito nell'ambito dei piani energetico ambientali regionali i quali però analizzano il territorio ad una scala molto più ampia di quella cui ci si riferisce nella presente ricerca (quartieri urbani) fornendo indirizzi e direttive che poi sono oggetto di recepimento alla scala di provincia e comune.

L'analisi dei consumi energetici negli edifici attraverso una ricognizione alla scala di quartiere a prevalenza residenziale è il principale obiettivo della ricerca, fermo restando l'apertura della metodologia verso altre applicazioni.

Le motivazioni del focus su questo obiettivo sono diverse. Il primo motivo riguarda considerazioni di carattere ambientale per cui l'evoluzione dello scenario di contrasto al cambiamento climatico insieme alla sua rapida evoluzione spinge verso la ricerca di strumenti che favorirebbero le politiche di efficientamento energetico, specie se estese alla scala urbana (si pensi, ad esempio, agli interventi di mitigazione del fenomeno effetto isola di calore urbano che sono ritenuti efficaci se applicati su aree vaste e non solo su singoli edifici); come risulta dal rapporto stilato nel 2021 dall'Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC [18] gli effetti del cambiamento climatico sono ormai sempre più marcati: a titolo di esempio gli ultimi quattro decenni sono i più caldi dal 1850; tra il 2011 e il 2020 la temperatura media della superficie terrestre è aumentata di 1,1 °C e risulta l'incremento maggiore di qualsiasi periodo di studio degli ultimi 100.000 anni. Ne risulta che le azioni dell'uomo nel limitare le emissioni di inquinanti e di gas serra in atmosfera stanno assumendo un ruolo primario nelle politiche di sviluppo dei paesi ed è in questo tema che le azioni di riduzione dei consumi e di efficientamento delle costruzioni si collocano in maniera strategica.

Il secondo motivo consiste nella messa a punto di uno strumento in grado di fornire indicazioni (più o meno accurate) circa lo stato del patrimonio edilizio analizzato. A conferma della necessità di disporre di strumenti operativi per il calcolo dei consumi energetici alla scala urbana, si evidenzia che nonostante esistono database di archiviazione ed analisi degli attestati di performance energetica delle unità immobiliari (il cosiddetto “catasto energetico”), al momento questi raccolgono

pochi dati rispetto al volume degli immobili costituenti il patrimonio edilizio esistente. A titolo di esempio, si consideri che nel catasto energetico della regione Puglia risultano censiti poco più di 200.000 attestati [19] a fronte di un patrimonio immobiliare di oltre 1.8 milioni di immobili [20] ovvero poco più del 10 %. Con queste condizioni al contorno è difficile trarre delle stime accurate circa le performance energetiche degli edifici se non con livelli di approssimazione elevati e in particolar modo servendosi delle analisi statistiche per realizzare inferenze tra il campione di cui si posseggono dati e l'intero patrimonio.

Il terzo motivo del focus dell'attività di ricerca riguarda la possibilità che la metodologia messa a punto con l'UESM offre in termini di pianificazione delle azioni di efficientamento energetico del patrimonio edilizio esistente. In questo modo, a partire dall'analisi del tessuto edilizio sarebbe possibile comprendere dove indirizzare risorse per migliorare le performance energetiche degli edifici e quindi ricercare i contesti più bisognosi di efficientamento. Tale tipo di programmazione risulterebbe utile per gli enti gestori di patrimonio edilizio residenziale pubblico, ma potrebbe essere di supporto anche nel settore privato per l'individuazione degli edifici più energivori. Si consideri che in Italia e in generale in Europa vi è una vasta parte di patrimonio immobiliare pubblico che può arrivare, a seconda dell'area geografica, al 10 % del totale [21]; tali immobili sono gestiti da enti pubblici che pianificano le azioni manutentive, tuttavia, solo una conoscenza di insieme delle aree in gestione può portare ad una adeguata programmazione delle risorse specie in quelle aree in cui la documentazione progettuale riferita agli edifici è incompleta o assente. In Italia, ad esempio, una parte consistente del patrimonio residenziale pubblico è stato costruito con la legge n. 167 del 1962 [22] ovvero in un periodo in cui la relazione tecnica descrittiva dell'involucro e degli impianti non era tra i documenti da depositare presso il comune di riferimento. Nell'ambito privato invece, lo strumento di analisi e stima dei consumi energetici alla scala urbana sarebbe particolarmente utile per le società di gestione di patrimoni immobiliari (si pensi a banche o assicurazioni), ma potrebbe avere anche una finalità di sensibilizzazione dei privati circa lo stato dell'immobile di

proprietà o rispetto ai benefici (ambientali o economici) che si potrebbero ottenere con l'adozione di misure di efficientamento energetico.

L'interesse della metodologia verso le aree a prevalenza residenziale dipende dalla maggiore applicabilità rispetto ad altre destinazioni d'uso, oltre che per la notevole disponibilità di dati (della letteratura e da indagini statistiche) riferiti al settore delle abitazioni, le quali sono responsabili di una buona parte dei consumi energetici (in Europa le abitazioni incidono per il 28 % sui consumi energetici complessivi [23]).

La tesi è strutturata in una prima parte di inquadramento e analisi critica dello stato dell'arte attraverso una ricognizione delle varie questioni scientifiche coinvolte con la metodologia messa a punto: gli Urban Energy Simulation Models, i livelli di sviluppo LODs per la modellazione alla scala urbana, le tecniche di rilievo di ambiti estesi, le analisi di sensitività dei dati di input più influenti sui risultati della modellazione energetica, le leggi di correlazione tra la trasmittanza termica di involucro e la temperatura superficiale, il GeoBIM e la gestione dati multi piattaforma BIM - GIS.

Successivamente è proposta la metodologia messa a punto strutturata per i LODs 1, 4 e 1+ nelle fasi di rilievo, di modellazione geometrica ed energetica, di costruzione del modello digitale georeferenziato GeoBIM. In questa parte è individuato, per i vari livelli di sviluppo del modello, il set di dati di input necessari alla modellazione, a ciascuno dei quali sono riportate le tecniche e le modalità di acquisizione oltre che possibili valori alfa numerici attribuibili.

A seguire sono proposti due casi di studio: il primo finalizzato all'esecuzione di test di accuratezza del metodo di rilievo fotogrammetrico proposto ed il secondo in cui l'applicazione della metodologia alla scala di distretto è stata validata mediante ricorso a dati misurati dei consumi di vettori energetici.

Il lavoro si completa con l'elaborazione per il secondo caso di studio del sistema digitale georeferenziato GeoBIM a partire da un set di indicatori di stato ritenuti rappresentativi nel bilancio energetico per l'area in esame. A seguire si sono espone anche alcune potenzialità della metodologia riferite, ad esempio, all'introduzione automatica dei dati di input per la modellazione energetica nel

database del software di calcolo o allo studio di fattibilità relativo all'introduzione di comunità energetiche.

2. STATO DELL'ARTE

La ricerca ha previsto una prima fase di analisi dello stato dell'arte relativamente alle tematiche esposte nella tabella 1 in cui si evincono i diversi argomenti analizzati (insieme agli elementi di criticità emersi) ciascuno dei quali ha fornito una base di conoscenza utile allo sviluppo della metodologia proposta.

Tabella 1 – Tematiche relative allo stato dell'arte analizzato

STATO DELL'ARTE ANALIZZATO					
UESMs	LODs degli UESMs	Rilievo	Analisi sensitività	Trasmittanza termica	GeoBIM
<p>classificazione generale: top down approach, bottom-up approach;</p> <p>classificazione particolare: analisi statistiche; modellazione fisica, ibrida e dati misurati.</p>	<p>classificazione maggiormente consolidata;</p> <p>ulteriori classificazioni nella letteratura;</p> <p>tools esistenti per le modellazioni energetiche alla scala urbana.</p>	<p>Tecniche di rilievo geometrico: - uso dei database esistenti; -rilievo fotogrammetrico; -tecniche LIDAR; -analisi semantica delle facciate.</p> <p>Tecniche di rilievo prestazionale: -tecnologie di involucro ed impiantistiche; -profili di occupazione ed uso dello spazio.</p>	<p>Analisi sensitività prestazioni energetiche: individuazione dei parametri più significativi.</p>	<p>Individuazione delle tecniche di acquisizione della trasmittanza termica di involucro opaco.</p>	<p>Definizione e ambiti applicativi;</p> <p>Vantaggi del GeoBIM;</p> <p>Livelli di maturità digitale;</p> <p>Possibili modalità di integrazione BIM - GIS.</p>
ELEMENTI DI CRITICITA' EMERSI					
<p>valutazioni sui temi: - accuratezza risultati; - accessibilità dei dati; - disponibilità di tools; - ambiti di impiego.</p>	<p>Classificazione per LODs solo geometrica, carenza di informazioni relative agli impianti, alle tecniche costruttive, ai profili d'uso, alla distribuzione degli spazi interni.</p>	<p>Difficoltà di accesso ai dati prestazionali relativi agli edifici oggetto di studio.</p>	<p>Non conoscenza della temperatura degli spazi interni.</p>	<p>Difficoltà di valutazioni speditive della trasmittanza alla scala urbana.</p>	<p>Dipendenza dalla disponibilità di dati (Open Data); Non consolidata integrazione tra BIM e GIS.</p>

2.1 Urban Energy Simulation Models

Il tema dell'efficientamento energetico nel settore delle costruzioni sta assumendo negli ultimi decenni un'importanza sempre maggiore, tuttavia l'attenzione si concentra per lo più sui singoli edifici; benché il tema del retrofit energetico alla scala urbana sia presente in diverse pubblicazioni scientifiche, la difficoltà di reperimento dei dati caratterizzanti gli immobili alla scala ampia (specie riguardanti i consumi energetici) combinata con il complesso lavoro di rilievo, rendono difficile l'applicazione di tale approccio.

La valutazione dei consumi energetici alla scala urbana richiede la messa a punto di Urban Energy Simulation Models (UESM) che consentono di valutare complessivamente l'area urbana oggetto di indagine per le sue performance energetiche a partire da una caratterizzazione degli edifici basata su parametri fisici o economici.

La messa a punto di UESM consente di analizzare ambiti urbani fornendo, oltre alla stima dei consumi energetici, anche strumenti di supporto alle decisioni per la pianificazione, ad esempio, di misure per il retrofit energetico; all'interno di questi modelli in realtà convergono varie discipline: la statistica, l'economia, la modellazione energetica, la ricerca operativa e in alcuni casi anche l'analisi del rischio [24].

Il primo modello per le simulazioni energetiche alla scala urbana risale agli inizi del 2000 [25] tuttavia solo più recentemente gli UESM hanno assunto maggior peso nella ricerca scientifica anche in ragione dei continui sviluppi sui temi della protezione dell'ambiente e lotta ai cambiamenti climatici.

Di seguito è proposta una sintesi e classificazione dei modelli per le simulazioni energetiche urbane ottenute dall'analisi della letteratura scientifica.

In letteratura a proposito di UESM consueta è la suddivisione in approcci "top-down" e approcci "bottom-up" [26-29] così come esplicitato in figura 2.

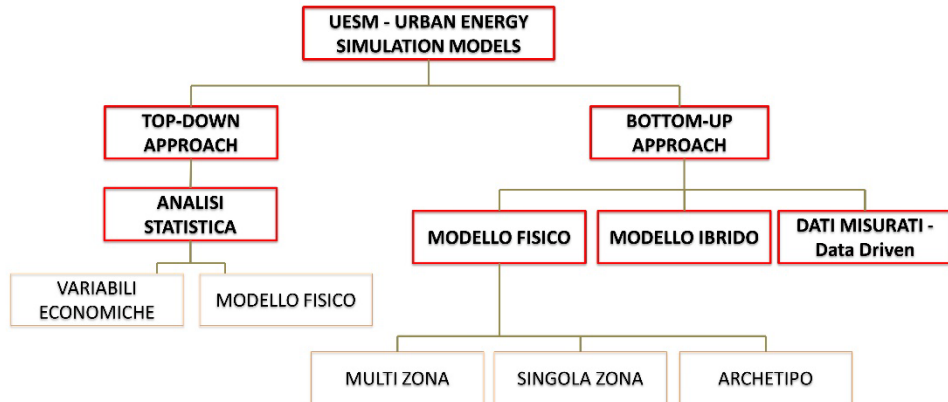


Figura 2 – Classificazione degli Urban Energy Simulation Models (UESM)

Gli approcci top-down [30,31] si basano su dati statistici aggregati per ottenere indicatori globali relativi alla prestazione energetica degli edifici esistenti e prevedere i consumi energetici. Questi ultimi sono calcolati attraverso relazione a lungo termine tra l'uso di energia rilevato e alcuni fattori principali collegati a variabili economiche o fisiche; i modelli in questione sono ulteriormente classificabili in sotto-modelli a seconda che considerino variabili economiche o variabili fisiche dell'area in esame.

Nell'approccio top-down, gli ambiti urbani oggetto di valutazione vengono studiati dal punto di vista energetico utilizzando i dati aggregati provenienti da serie storiche, per analizzare le relazioni tra gli aspetti energetici, tecnologici ed economici.

Nell'ambito degli approcci top-down - analisi statistica - variabili economiche sono spesso impiegati come dati di input alcune variabili economiche come il prodotto interno lordo, i parametri sociali come la dimensione dei nuclei familiari e la popolazione, oltre che dati quali il prezzo della fornitura elettrica.

Nell'approccio top-down - analisi statistica - modello fisico è invece impiegata un'analisi che utilizza dati statistici aggregati riferiti alle tecnologie di climatizzazione, ai volumi riscaldati negli edifici, alla tipologia edilizia ricorrente, al vettore energetico utilizzato.

L'approccio top-down giunge alla determinazione dei consumi energetici sulla base di analisi statistiche, senza far dipendere necessariamente il risultato dalla conoscenza della fisica del fenomeno.

L'approccio bottom-up [32-34], invece, simula il consumo energetico urbano sulla base dei consumi dei singoli edifici presenti all'interno dell'area oggetto di indagine. Questo approccio può essere ulteriormente classificato a seconda che si basi su: modelli fisici, dati misurati o su modelli ibridi.

Il modello fisico impiega i dati caratterizzanti i singoli edifici esistenti come input: la tipologia edilizia, l'area edificata, la geometria edilizia, unitamente a informazioni non geometriche come, ad esempio, i parametri caratterizzanti le performance energetiche degli involucri edilizi o degli impianti tecnologici. Si precisa che in questo tipo di modellazione i dati relativi agli edifici oggetto di studio non sono sempre disponibili e in molti casi sono oggetto di rilievo in situ.

I modelli fisici sono inoltre classificati ulteriormente in: modelli basati sull'edificio archetipo o edificio di riferimento; modelli multi-zona (modelli dettagliati); modelli a singola zona (modelli semplificati).

Risulta dunque la seguente suddivisione per gli approcci bottom-up – modelli fisici:

- approccio basato sull'edificio archetipo o di riferimento: introdotto per la prima volta nel 2011 [35-36] consiste nell'analisi del contesto urbano e nel riconoscimento in tutti gli edifici analizzati degli aspetti costruttivi, tipologici, formali, dimensionali ed impiantistici ricorrenti. Questo approccio va ad individuare alcuni edifici di riferimento (archetipi) dell'area analizzata quindi a ricondurre i risultati dell'analisi energetica alla scala ampia di distretto;
- multi zona: il modello viene costruito considerando tutte le zone termiche degli edifici indagati a ciascuna delle quali dovranno essere attribuiti i necessari parametri termofisici poi inseriti nel modello di calcolo (il volume, il rapporto tra superfici vetrate e pareti opache WWR, la tipologia costruttiva degli elementi di involucro, i profili di occupazione, gli apporti interni, le modalità di funzionamento degli impianti di climatizzazione, ecc.).

L'approccio descritto è tra i più comuni nell'utilizzo, anche se va tenuta in considerazione la non trascurabile difficoltà di ricerca dei dati per ciascun edificio a sua volta diviso in più zone termiche (modello multi zona). Spesso la fase di raccolta dati georeferenziati può essere gestita in ambiente GIS [37] allo scopo di costruire dei database informativi circa le caratteristiche di ciascun immobile.

- singola zona: in questo approccio alla modellazione si fa corrispondere ad ogni edificio una singola zona termica; nell'ambito di questo approccio si è soliti attribuire delle caratteristiche medie uniche per tutto l'organismo edilizio che è trattato come un singolo volume.

L'approccio Bottom-up – Data Driven è improntato sull'utilizzo di regressioni statistiche allo scopo di calcolare il consumo energetico a scala urbana. In generale, si può affermare che a seconda della quantità e qualità dei dati misurati, è difficile integrare il modello con dati relativi alla morfologia urbana indagata; in altri termini in questa tipologia di approccio è difficile individuare correlazioni tra aspetti geometrici dell'edificio e dati di consumo dei vettori energetici [36]. Questo tipo di approccio però vede interessanti applicazioni nell'uso dell'intelligenza artificiale (A.I.) e nello specifico delle reti neurali artificiali ANN (Artificial Neural Network) allo scopo di trovare correlazioni tra i consumi rilevati (quando disponibili) e le performance energetiche degli edifici [35].

L'approccio alla modellazione di tipo ibrido (Bottom-up approach – Modello Ibrido) rappresenta un tipo intermedio di modello tra quello fisico e quello basato sui dati misurati; nel modello vengono impiegati i dati di consumo energetico misurati insieme all'analisi della fisica degli edifici allo scopo di calcolare il consumo energetico alla scala urbana.

In generale risulta che l'approccio top-down consente di condurre analisi energetiche semplificate che non possono considerare i complessi meccanismi termodinamici che governano la fisica del fenomeno; l'approccio dal basso verso l'alto invece studia (nel caso dell'edificio archetipo) i fabbisogni energetici di campioni di edifici per estrapolare i risultati a interi stock.

L'approccio top-down si presta meglio ad analisi alla scala di città o anche di provincia impiegando dati macro-statistici per stimare il consumo energetico urbano ovvero considerando gli edifici all'interno dell'area oggetto di studio come un unico soggetto energetico.

Al contrario l'approccio bottom-up simula il consumo energetico urbano in base a quello dei singoli edifici costituenti l'area oggetto di valutazione. Tuttavia, specie nel caso dell'edificio archetipo, l'accuratezza del metodo è sensibile alla rappresentatività degli edifici oggetto di analisi dettagliate e della quantità e qualità dei dati di input.

Rispetto a quanto esposto, si riportano le seguenti considerazioni riguardanti i seguenti aspetti:

- **accuratezza dei risultati:** l'analisi della letteratura scientifica conferma come i metodi dal basso verso l'alto (bottom-up) consentano di ottenere risultati più accurati rispetto a quelli dall'alto verso il basso (top-down); in genere il motivo è legato alla minore estensione dell'area di analisi oltre che alla necessità di questo tipo di modellazione di tenere in conto gli aspetti morfotipologici e tecnologici degli edifici indagati. Come risulta dalla letteratura riportata in [35] l'approccio alla modellazione che produce risultati più accurati nell'analisi è l'approccio bottom-up del tipo multi-zona. Questo approccio è ormai ampiamente implementato nei software di modellazione ma mantiene le difficoltà relative al reperimento del set di dati di partenza; va anche considerato che i tempi di simulazione per l'esecuzione del calcolo energetico sono maggiori rispetto a quelli relativi all'approccio top-down.
- **accessibilità dei dati:** i dataset di natura statistica comunemente utilizzati per l'analisi top-down rendono questo tipo di approccio di più semplice implementazione rispetto alla possibilità di reperimento dei dati di input. Spesso i dati di input in questione sono disponibili in quanto ricercati e messi a disposizione dagli istituti di censimento, dalle utility di fornitura dell'energia, dalle Authority di regolamentazione del mercato. Al contrario nell'approccio bottom-up essendo necessaria la caratterizzazione termo-fisica dell'oggetto

edilizio, di solito l'attività di ricerca dei dati di input è più complessa e laboriosa.

A proposito della disponibilità di strumenti per il reperimento di dati aggregati per la stima dei consumi energetici, in [38] è possibile reperire dati aggiornati suddivisi per nazione relativi ai consumi di energia (elettricità, gas, carbone, combustibili, rinnovabili) elaborati dall'IEA (International Energy Agency). Il database in questione consente, individuato il paese in esame, di ottenere informazioni relative a diversi aspetti coinvolti con il tema della produzione o consumo di energia con intervalli temporali annuali a partire dai primi monitoraggi del 1990 sino ai giorni nostri. Database di questo tipo sono anche sviluppati da altri organismi, in [39] è proposto un sistema informativo simile a quello appena descritto redatto dalla Banca Mondiale.

Tra i riferimenti in letteratura più significativi si segnala: in [40] è presentato uno strumento web-GIS che consente di conoscere i dati di consumo energetico relativamente ai distretti urbani della città di Friburgo (Svizzera); strumenti di questo tipo sono stati sviluppati anche per l'intera città di Toronto (Canada) [41].

- **disponibilità di tools per le simulazioni:** dagli studi di Sola [42] risulta che per quanto riguarda l'approccio bottom-up vi è una maggiore disponibilità di tools e software per l'analisi energetica rispetto all'approccio top-down che invece porta con sé minori variabili da prendere a riferimento, analizzate per lo più con tecniche statistiche. I tools e i software per le simulazioni energetiche di tipo bottom-up più comunemente utilizzati per questo scopo sono: CitySim, EnergyPlus, Trnsys, Envi-met, SynCity.

I software per le analisi top-down sono talvolta i medesimi utilizzati per le analisi statistiche come: MatLab, Matplotlib, Excel.

- **ambito di impiego dei risultati:** la modellazione dall'alto verso il basso è usata maggiormente nelle analisi alla scala di città, viene dunque impiegata nella predizione e nell'analisi dei consumi energetici alla scala vasta. L'approccio dal basso verso l'alto, mantenendo una maggior connessione tra

caratteristiche morfologiche e consumi di energia degli edifici, è più utilizzato per applicazioni finalizzate al progetto degli interventi (anche locali) di efficientamento energetico. A conferma di ciò si rimanda agli studi di Parshall [43] e Caputo [44]; nel primo, l'approccio top-down consente una stima dei dati di consumo energetico su maglie molto ampie (chilometri quadrati) permettendo di studiare interi territori, al contrario, in [44] l'approccio bottom-up consente di trovare correlazioni tra aspetti urbani e dei singoli edifici, con i consumi energetici alla scala ampia.

2.2 LODs relativi agli UESM

Gli urban energy simulation models sono classificabili oltre che rispetto all'approccio alla modellazione, dall'alto verso il basso e dal basso verso l'alto (si veda il paragrafo precedente), per il livello di dettaglio con il quale si intende rappresentare l'area urbana; esplicitativo è il contributo della letteratura di Biljecki [45] che riporta una classificazione in quattro livelli di sviluppo del modello alla scala urbana (level of development - LOD) in funzione del livello di dettaglio rispetto alla rappresentazione delle geometrie e delle varie tipologie di elementi costituenti gli edifici. In figura 3 è riportato un quadro di sintesi.

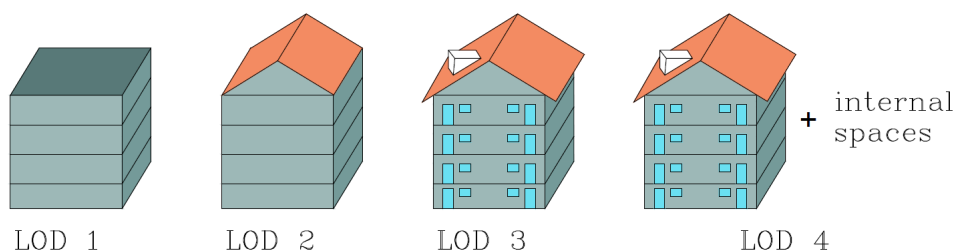


Figura 3 – rappresentazione grafica dei diversi livelli di sviluppo del modello energetico alla scala urbana (LODs)

Si vede come al LOD 1 vi è una rappresentazione molto semplificata dell'oggetto costruito la cui geometria è resa mediante una rappresentazione prismatica dei volumi rinveniente dall'estrusione della proiezione sul piano orizzontale della sagoma esterna dell'edificio; nell'ambito di questo tipo di modellazione energetica non è possibile diversificare per tecnologia le varie parti di involucro che

sarà trattato per macro categorie (murature, copertura e basamento); le superfici trasparenti vengono tenute in considerazione attraverso il parametro WWR (windows to wall ratio) ovvero mediante un indicatore sintetico del rapporto percentuale tra le superfici trasparenti e quelle opache. Al LOD1 non vengono tenuti in considerazione i volumi non riscaldati e quindi l'intero spazio confinato è trattato come un'unica zona termica riscaldata.

Al LOD 2 vi è invece la prima classificazione tipologica di parti di involucro e le coperture appaiono definite per geometria. Quanto alle chiusure trasparenti, di queste se ne terrà conto per la geometria solo al LOD3 in cui l'oggetto edilizio è descritto rispetto all'involucro con un elevato livello di dettaglio. Il LOD4 si differenzia dal precedente LOD3 per la rappresentazione anche delle geometrie interne ovvero della distribuzione delle partizioni interne verticali.

La descrizione riportata a proposito dei diversi livelli di sviluppo del modello rappresentativo dell'area urbana è generalmente accettata oltre ad essere implementata nello standard CityGML [46] ormai molto diffuso tra i software di modellazione urbana.

Per CityGML si intende uno standard che definisce il formato di scambio dati relativo alla rappresentazione alla scala urbana per una pluralità di applicazioni: rappresentazione 3D virtuale della città, smart cities, rappresentazione delle infrastrutture stradali, base dati per simulazione del traffico, per analisi dei consumi energetici, gestione del territorio, supporto alla rappresentazione catastale degli edifici. In generale, lo standard CityGML definisce l'architettura di base del modello informativo semantico associato alla rappresentazione virtuale della città prevedendo delle categorie rappresentative di entità che costituiscono gli spazi urbani; la struttura di questo formato di scambio dati sottende alla classificazione per LODs da 1 a 4 prevedendo un livello di complessità geometrica e tipologica crescente con l'aumentare dei LODs. CityGML implementa inoltre l'architettura dati basata sul cosiddetto Geography Markup Language - GML [47] ovvero una sorta di dizionario universale da adottare per la rappresentazione di oggetti che definisce per ciascuna entità visualizzata un dataset di dati minimi necessari codificati secondo uno schema

prestabilito in un documento testuale: caratteristica, tipologia, geometria (punto, linea, polilinea), coordinate nel sistema di riferimento, dati numerici associati, unità di misura, oggetto, entità, ecc. Questo set di dati che costituiscono la “grammatica” del GML format, che è implementato nello standard CityGML, è anche descritto nella ISO 19136 [48].

Si evidenzia come, in realtà, nella letteratura esistono articolazioni simili a quella proposta, spesso basate su ulteriori ramificazioni dei LODs principali individuati a seconda che si prendano in considerazione aspetti relativi a complessità geometrica, accuratezza nelle dimensioni, aspetto, coerenza spazio-semantiche e attributi. A titolo di esempio Biljecki [49] propone di effettuare una classificazione in 10 LODs (da LOD 0 a LOD 9) in funzione del livello di risoluzione geometrica del modello: al LOD0 corrisponde un'unità minima di rappresentazione dello spazio pari a un cubo di 10 m di lato, al LOD4 di 1 m, per arrivare al LOD 9 con una risoluzione di 20 cm. Questo tipo di classificazione non è legata all'analisi semantica dei prospetti finalizzata al riconoscimento delle varie unità costituenti, ma collega il concetto di accuratezza del modello con quello di risoluzione spaziale per cui tanto più è il LOD e maggiori saranno gli elementi tecnici rappresentabili.

Un altro aspetto di interesse su cui la ricerca si è concentrata a proposito dei LODs, riguarda l'individuazione del livello di sviluppo più appropriato per la rappresentazione delle aree urbane; secondo la ricerca di cui al riferimento [50] la suddivisione in quattro LODs risulta adeguata con gli obiettivi di effettuare analisi alla scala di quartiere o comunque relativa ad un numero limitato di edifici, mentre in caso di applicazioni che riguardano intere città, questa suddivisione rischia di essere poco giustificata. Nella ricerca in questione si pone la necessità di lavorare alla scala urbana ricorrendo ad un ulteriore LOD ovvero al LOD0 e cioè facendo riferimento ad una rappresentazione degli edifici come forme chiuse ottenute dalla proiezione al suolo della sagoma delle costruzioni. La ricerca propone anche uno schema logico di lavoro per consentire di automatizzare il passaggio dai LODs a risoluzione medio alta (come il LOD 2-3) verso quello a risoluzione più bassa, il LOD 0.

Nella ricerca di Besuievsky [51] viene proposto uno strumento flessibile di decodifica della complessità geometrica dei modelli 3d delle aree urbane basate sulla cosiddetta “procedural modelling” ovvero su algoritmi scritti che a partire dal modello dettagliato dell’area urbana consentono di costruire modelli semplificati ai LOD 0, 1 e 2. Lo strumento è di interesse perché consente di precisare nel modello gli elementi che dovranno essere inseriti oppure no nel risultato di output e quindi introduce flessibilità alla classificazione per LODs in grado di adattarsi alle finalità di ricerca, ad esempio si può decidere se rappresentare oppure no una certa unità tecnica ad un LOD. per cui al LOD1 si potrebbe impostare una rappresentazione dei soli volumi e delle superfici finestrate.

Un’altra questione di interesse ricollegata ai LODs riguarda la modalità di acquisizione dati; infatti, secondo quanto riportato nello studio di Wate [52], nella rappresentazione delle aree urbane le tecniche di rilievo da adottare sono la fotogrammetria satellitare o aerea, le scansioni LIDAR, la fotogrammetria a distanza ravvicinata e il rilievo con stazione totale. Queste tecnologie sono caratterizzate da livelli di accuratezza diversi e quindi è possibile un impiego delle tecniche basate sul rilievo satellitare o aereo per rappresentazioni ai LODs più bassi (1 e 2), preferendo quelle più accurate ai LODs più alti come il 3 e il 4.

Dall’analisi e classificazione dei LODs qui proposta, emerge come l’attenzione sia concentrata sulle geometrie, sull’analisi semantica e in particolar modo sugli esterni degli edifici presenti nell’area urbana; altre questioni, di particolar interesse specie per le finalità di modellazione energetica, sono quelle relative agli impianti presenti, ai profili di occupazione ed uso dello spazio, alla suddivisione indoor. Sui primi due aspetti non si sono individuate classificazioni (in termini di LODs) o requisiti minimi e questo perché la rappresentazione dell’area urbana secondo il criterio dei LODs non nasce per le sole finalità di modellazione energetica ma più in generale serve per descrivere lo spazio per varie finalità: trasporti, indicatori sintetici, storage di dati, analisi ambientali, analisi energetiche. La suddivisione dello spazio interno, secondo la letteratura esposta [45], è presente solo al LOD4, tuttavia già a partire dal 2009 con gli studi Hagedorn [53] si è iniziato a ragionare anche in termini di livelli di

dettaglio nella rappresentazione dello spazio interno a partire dalla constatazione che sia la letteratura che la tecnica erano mancanti di indicazioni circa i requisiti minimi per descrivere gli interni degli edifici nello spazio urbano.

Più recentemente secondo quanto riportato da Boeters [54] si è studiata la possibilità di avere una suddivisione dello spazio interno semplificata già a partire dal LOD2 mediante una semplice divisione attraverso gli orizzontamenti del volume chiuso costituente l'edificio; in questo modo il modello dell'area urbana porta con sé anche informazioni sulle singole unità immobiliari presenti.

La disamina della letteratura qui riportata pone l'attenzione nella descrizione morfo-tipologica delle geometrie costituenti l'involucro edilizio, invero non si rileva alcuna classificazione relativa ai molteplici altri aspetti riguardati la descrizione, sotto il profilo energetico, dell'area urbana. In questo senso, esplicativo è il capitolo n.3 dal quale si evince il contributo nel panorama scientifico, nell'ambito della presente ricerca di dottorato, di indicare i parametri minimi necessari per effettuare le analisi energetiche in funzione del livello di sviluppo del modello; sono dunque trattati aspetti relativi alla descrizione del territorio, alla popolazione residente, alle tecnologie presenti, alle apparecchiature, ai sistemi di illuminazione e alle modalità di ventilazione degli spazi interni. In altri termini la ricerca punta a presentare una decodifica di tutti gli aspetti coinvolti nella modellazione energetica alla scala urbana calibrati in coerenza con il livello di dettaglio dei LODs da 1 a 4. Si precisa che mentre per le questioni legate alla rappresentazione geometrica e semantica dell'area urbana si fa riferimento a quanto riportato nella letteratura [45], l'individuazione e l'associazione ai singoli LODs di tutte le altre tipologie di dati inerenti agli aspetti costruttivi, impiantistici, di occupazione e utilizzo dello spazio, sono stati oggetto della ricerca esposta al capitolo 3.

Nell'ambito degli UESM di interesse è la disamina dei tools esistenti finalizzati alla conduzione delle analisi energetiche alla scala urbana. Come risulta dalla letteratura riportata in [55] i principali strumenti disponibile per l'effettuazione di simulazioni energetiche alla scala urbana sono:

- CitySim [56]: sviluppato nel 2009 da EPFL (Scuola politecnica federale di Losanna) disponibile liberamente dal sito web degli sviluppatori. Come riportato nel riferimento [57], il modello energetico degli edifici implementato nel software è semplificato con un circuito elettrico equivalente, che è utilizzato per valutazioni complessive alla scala di quartiere o città riferite, di solito, al comportamento complessivo di un sistema di edifici; lo strumento è dotato di un modello di calcolo basato su un solutore costituito secondo la logica “reduced order modelling”, ovvero una rappresentazione semplificata della fisica del comportamento energetico globale dell’edificio costituito da un circuito elettrico resistenze-capacità che interagisce con quattro modelli essenziali: modello termico, modello di radiazione solare, modello comportamento dell’utente e modello impianti ed apparecchiature. La singola zona termica dotata di una capacità termica globale C_i è rappresentabile mediante un nodo in cui per mantenere la temperatura dell’aria interna θ_a partecipano al bilancio termico il flusso termico attraverso l’involucro (pavimenti, murature e coperture ciascuno dei quali è considerato avere la stessa temperatura omogenea), i guadagni interni L_c , il riscaldamento H e il raffrescamento C , oltre alle dispersioni attraverso le finestre e per ventilazione UA . Il modello di calcolo restituisce come output diversi risultati tra cui il calcolo del fabbisogno energetico per riscaldamento o raffrescamento. Il livello di dettaglio dei dati di input per la modellazione corrisponde al LOD1 ovvero ad una rappresentazione semplificata dello spazio urbano finalizzata ad una ricognizione del consumo energetico complessivo, dato dalla sommatoria del contributo dei singoli edifici, senza tenere conto dei flussi energetici dovuti allo spazio urbano. Il software presenta un’interfaccia grafica basata su JAVA di tipo user-friendly che attraverso delle maschere di dialogo consente l’introduzione dei dati di input all’interno del modello di calcolo di tipo semi stazionario. L’applicativo consente l’introduzione di modelli 3D o .dxf degli edifici che vengono, per semplicità, ridotti a semplici volumi;

- CEA - City Energy Analyst [58] realizzato nel 2016 dall'ETH Zürich and Singapore disponibile liberamente con registrazione. Basato sul modello di calcolo descritto dalla ISO 13790, si tratta di un programma in cui la rappresentazione delle zone termiche è basata su un circuito elettrico con una capacità termica complessiva C_m e 5 resistenze identificative delle dispersioni per ventilazione, attraverso le finestre, per conduzione o radiazione dell'involucro opaco, tra le superfici interne e la temperatura dell'aria; il tutto con condizioni al contorno come la temperatura dell'aria interna, esterna e superficiali. L'algoritmo è basato sul bilancio energetico del sistema in cui l'energia da fornire al sistema risulta dal bilanciamento tra il calore da immettere nella zona termica (attraverso impianti e apporti gratuiti) e quello dovuto alle dispersioni termiche.

Gli output ottenibili sono molteplici: fabbisogni energetici per riscaldamento e acqua calda sanitaria, consumi finali di vettori energetici (gas metano e energia elettrica), produzione di energia da fonti rinnovabili.

La modellazione prevede l'inserimento di dati di input al LOD1 e si presta per finalità di analisi di interi quartieri o città per ottenere indicazioni circa i consumi di energia.

Il software prevede un'interfaccia grafica user-friendly che consente di visualizzare simultaneamente sia l'area urbana oggetto di studio sia l'interfaccia con le varie tipologie di dati di input costituenti il database contenente i dati tecnici delle costruzioni oggetto di studio.

- URBANopt [59]: sviluppato nel 2016 da NREL (National Renewable Energy Laboratory) disponibile in forma open, basato sulla modellazione energetica in regime dinamico effettuata con Energy+. Si tratta di un modello implementato in un applicativo non dotato di interfaccia grafica utente che deve essere messo in relazione con software di gestione come OpenStudio. Il modello di calcolo è in particolar modo utilizzabile in contesti di limitata estensione essendo basato sulla modellazione energetica in regime dinamico che prevede la conoscenza di molteplici parametrici descrittivi nella tecnologia

edilizia, condizioni al contorno e comportamento degli utenti. Lo strumento è in particolar modo utile per le analisi comparative e di scenario.

La modellazione richiederebbe dati di input con un livello di dettaglio elevato disponibili ai LODs 3 e 4.

2.3 Sistemi per il rilievo esteso alla scala urbana

La trattazione che segue è relativa ai sistemi per il rilievo esteso alla scala urbana riguardanti le principali proprietà termofisiche degli edifici indagati.

Nel seguito, per circoscrivere l'area oggetto di indagine, ci si riferirà ad ambiti urbani coincidenti con quartieri di medio-piccole dimensioni; gli strumenti proposti troverebbero una difficile applicazione in ambiti più ampi. Infatti, sono in essere anche tecnologie per il rilievo alla scala di intere regioni (come le tecnologie satellitari).

Con specifico riferimento agli aspetti morfologici degli edifici, come risulta dalla letteratura di cui al riferimento [60], oltre ai metodi di rilievo tradizionali [61], è possibile condurre il rilievo alla scala urbana attraverso le seguenti tecnologie:

- **uso dei database esistenti:** si tratta dell'approccio più conveniente in termini di rapidità di acquisizione dei dati in quanto già disponibili e con differenti livelli di elaborazione. Allo stato attuale i più comuni formati disponibili per lo storage dei database sono CityGML, Shapefile e GeoJSON [62,63].

Il CityGML è basato sull'architettura XML ed è utilizzato per lo storage e lo scambio dati di rappresentazioni virtuali 3D delle aree urbane. Lo standard CityGML implementa la codifica dei LODs presentata al paragrafo precedente (da 1 a 4); come risulta dalla letteratura [64] in genere le analisi ai LODs 1 e 2 sono sufficienti per una rappresentazione più o meno accurata dell'area urbana, l'analisi ai LODs 3 e 4 sono invece difficilmente utilizzati nelle analisi a causa del notevole livello di dettagli richiesti come dati di input.

Lo Shapefile è un sistema di scambio dati basato su vettori, comunemente utilizzato in software come QGIS [65]; questo formato di scambio consente lo storage di diverse informazioni relativi all'ambito urbano, organizzate all'interno di tabelle attributi.

Infine, il formato GeoJSON che è simile al precedente ma in particolare pensato per l'integrazione con web applications, a titolo di esempio il Chicago Data Portal (Chicago) [66] o il database di Microsoft relativo alle sagome degli edifici [67] sono realizzati in GeoJSON.

- **rilievo fotogrammetrico** [68]: la fotogrammetria è la tecnica che consente di determinare la posizioni dei punti di un oggetto reale utilizzando le posizioni dei punti corrispondenti sulle immagini acquisite a mezzo di velivoli aerei (aerofotogrammetria) o da rilievo terrestre. La tecnica prevede la fase di acquisizione dei fotogrammi mediante opportune tecniche di orientamento in cui vengono eseguite le operazioni per determinare le relazioni geometrico-analitiche tra i centri di presa e i fotogrammi, identificando univocamente la posizione della camera al momento della presa; in questo modo è possibile ricostruire l'oggetto indagato mediante un insieme di punti creando una nuvola di punti. La tecnica aerofotogrammetrica è in particolar modo utilizzata per il rilievo di gruppi di edifici o piccoli quartieri.
- **tecniche LIDAR** [69]: si tratta di una tecnica di telerilevamento per l'esecuzione di rilievi topografici ad alta risoluzione; il risultato del rilievo è una scansione con un elevatissimo livello di dettaglio dell'area oggetto di studio. L'attività di rilievo può essere effettuata sia mediante mezzi aerei o da terra; è previsto l'impiego di un laser scanner composto da un trasmettitore, da un ricevitore e da un sistema di acquisizione dati. La tecnica è caratterizzata da un'altissima velocità di acquisizione dei dati abbinata ad un livello di accuratezza che può essere sub-centimetrica.

Altri aspetti connessi con le geometrie sono:

- **l'individuazione delle componenti finestrate allo scopo di calcolare il rapporto WWR**: per questa finalità, nello studio proposto in [70] è individuato un metodo per il riconoscimento delle superfici finestrate basato sullo studio delle temperature superficiali. Il rilievo LIDAR combinato con le riprese termografiche permette l'implementazione di algoritmi automatici per il riconoscimento di superfici vetrate sulla base di criteri: "in base a valori

empirici ottenuti attraverso più esperimenti, le superfici vengono riconosciute come due superfici diverse se il valore assoluto della differenza di temperatura tra due aree è maggiore di 5 °C e minore di 10 °C”.

- **l’analisi semantica delle facciate** per caratterizzarle tipologicamente ovvero arrivare ad un riconoscimento automatico o semi-automatico delle caratteristiche costruttive. In letteratura sono presenti i lavori [71,72] basati sulle cosiddette “split grammar” ovvero su algoritmi in grado di analizzare le immagini acquisite dei prospetti, segmentarle in unità sempre minori fino a ricondurle ad unità base come una finestra, una loggia o un balcone. Nei riferimenti [73-75] sono presentati lavori basati sull’analisi semantica dei prospetti e finalizzati all’individuazione di piani di suddivisione delle facciate quindi a decodificare anche con algoritmi di A.I. porzioni di involucro (prospetto, piani, superfici finestrate, elementi decorativi, ecc.).

Infine, nello studio proposto in [76] il procedimento di segmentazione automatica dei prospetti è applicato a delle immagini reperite da Google Earth con la finalità di individuare vani finestra sulla base del criterio “i piani di divisione orizzontale dovrebbero essere posizionati dove le linee verticali sono più rare e quelle orizzontali sono più dense, i piani di divisione verticale dovrebbero essere posizionati dove le linee orizzontali sono più rare e le linee verticali sono più dense”.

Con riferimento ad aspetti non geometrici caratterizzanti l’area urbana oggetto di rilievo, dalla consultazione della letteratura riportata in [60] risulta che gli aspetti più indagati sono quelli relativi a:

- **tecnologie di involucro ed impiantistiche:** la determinazione delle caratteristiche costruttive dell’involucro edilizio e delle tecnologie impiantistiche per applicazioni alla scala urbana avviene mediante l’uso di database esistenti (TABULA [77] ne è un esempio) o di analisi statistiche condotte da diversi istituti (in Italia, l’Istat con il censimento della Popolazione e delle Abitazioni [78]);

- **profili di occupazione ed uso dello spazio:** in questo caso per le analisi alla scala urbana si è soliti fare riferimento a normative tecniche di settore come la ISO 13790 [79] in cui si possono trovare dei profili d'uso standard da adottare nella modellazione energetica, o a pubblicazioni scientifiche derivanti da analisi statistiche su dati misurati [80].

2.4 Analisi di sensitività – valutazione degli indicatori più significativi

Le analisi di sensitività applicate ai modelli energetici sono strumenti in grado di fornire indicazioni circa quei parametri di input adoperati la cui variazione produce gli effetti più significativi sull'output analizzato; queste analisi consentono di individuare i parametri che hanno maggiore rilevanza sull'accuratezza del modello energetico.

La procedura di analisi di sensibilità prevede che gli input del modello vengano modificati (singolarmente o a gruppi) nella misura di interesse (in genere si assumono variazioni piccole, entro il 10 %) e viene calcolata la variazione dell'output in esame. In generale la variazione di un output rispetto all'input può essere:

- nulla, ovvero la variazione del parametro di input non è significativa sull'output in esame;
- costante (effetto lineare o additivo)
- dipendente da un'altra variabile di input (effetto non lineare o di interazione tra gli input).

L'analisi di sensitività può essere condotta attraverso il calcolo dei coefficienti di sensitività (c.s.) secondo quanto proposto in [81]; si tratta di valori numerici adimensionali attribuiti a tutti i parametri di input capaci di metterli in relazione tra loro ed evidenziare quelli la cui variazione produce i maggiori effetti sul dato di output in esame. La procedura da adoperare è la seguente:

- a ciascuno dei parametri di input è assegnato un valore o un set di valori (k_i);
- ogni parametro di input subisce singolarmente (mentre gli altri non cambiano) una piccola modifica Δk_i e viene eseguito il modello;

- le variabili di output vengono utilizzate per calcolare i coefficienti di sensibilità e i coefficienti di sensibilità normalizzati con la relazione che segue.

$$\frac{\partial y_i}{\partial k_i} \approx \frac{y_i(k_i + \Delta k_i) - y_i(k_i - \Delta k_i)}{2\Delta k_i} \quad i=1, n \quad \text{and} \quad j=1, m$$

Dove y_i è la variabile di output, k_i è parametro di input.

La derivata rappresenta il coefficiente di sensitività relativo alla variabile di output y_i e alle variabili di input k_i ; $y_i(k_i + \Delta(k_i))$ è il valore che assume la variabile di output quando la variabile di input è incrementata.

Tra le analisi di sensitività più di interesse ricercate nella letteratura risulta che:

- Raji [82] propone un'analisi di sensitività applicata ai metodi in regime dinamico analizzando come dato di input il rapporto tra superfici finestrate e superfici opache WWR – windows to wall ratio. L'analisi è applicata al caso studio costituito da un edificio torre da 40 piani con destinazione ad uffici posto in tre distinte zone climatiche (zona con clima freddo, arido o temperato); il motore di calcolo è Energy+. L'edificio studiato presenta un involucro con trasmittanza pari a 0,35 W/m²K per le parti opache e 1,3-1,5 W/m²K per superfici finestrate, le schermature sono costituite da veneziane con lamelle ad alta riflettività.

L'analisi di sensitività considera come output il consumo energetico globale dell'edificio e prevede l'esecuzione di diverse simulazioni, variando di volta in volta la WWR in intervalli da 0 a 100 % in scenari progettuali che ipotizzano soluzioni architettoniche a pianta stretta o quadrata nei climi temperati, subtropicali e tropicali.

Il risultato dell'analisi è che il WWR ottimale cambia in funzione del clima: ad esempio in un clima temperato un rapporto finestra-parete tra il 20% e il 30% porterebbe alla massima efficienza energetica. Un dato di interesse cui giunge lo studio è che fin tanto che il rapporto WWR è compreso tra il 20-40 %, la variazione sulla energia totale consumata è sempre compresa nel 5 % di variazione.

- Arababadi [81] propone un'analisi di sensibilità relativa al modello ECCABS (Energy, Carbon and Cost Assessment for Building Stocks) messo a punto per analizzare le performance energetiche del patrimonio edilizio del Regno Unito effettuando simulazioni energetiche su un campione di 192 edifici residenziali. Il modello impiegato è del tipo bottom-up. Il modello ECCABS calcola come output il fabbisogno energetico del patrimonio edilizio in base alle proprietà termiche e fisiche degli edifici campione. L'analisi evidenzia i parametri di input in grado di produrre i maggiori effetti sull'output del modello ovvero: la temperatura dell'aria interna (il parametro più sensibile, c.s. - coefficiente di sensibilità normalizzato pari a 1,63), il valore di trasmittanza medio dell'edificio (c.s. pari a 0.88) e la superficie esterna disperdente (c.s. pari a 0.87).
- Mastrucci [83] conduce un'analisi di sensibilità su un modello semi-stazionario finalizzato al calcolo dei consumi per il riscaldamento degli ambienti e l'acqua calda sanitaria utilizzando un intervallo temporale mensile. I parametri di input utilizzati nell'analisi di sensitività sono: la superficie di piano, il windows to wall ratio, la tipologia di serramenti esterni, la trasmittanza termica delle superfici vetrate, della copertura e del pavimento, il numero di ricambi d'aria orari (1/h), la temperatura di set point interna e il tipo di impianto di riscaldamento (generatore a gas tradizionale o a condensazione). Il parametro di output analizzato è l'intensità del consumo energetico finale $q_{E,V}$ (kWh/m²anno).
I risultati dell'analisi evidenziano un'elevata sensibilità dei parametri quali la temperatura di set point degli impianti, le caratteristiche geometriche dell'involucro disperdente e il tipo di sistema di riscaldamento. Meno sensibili sono i parametri come il WWR, la trasmittanza delle superfici finestrate e il tasso di ricambi orari d'aria;
- Nel contributo [84] Nouvel conduce un'analisi di sensitività finalizzata a valutare l'effetto di una rappresentazione geometrica semplificata

(LOD1) o più dettagliata (LOD2) relativa ad aree urbane, il parametro di output è l'urban heating demand. Lo studio è applicato a Ludwigsburg (una cittadina di 14.000 edifici e 90.000 abitanti) in Germania. Lo studio evidenzia come, assumendo la modellazione al LOD2 più accurata, lo scostamento tra il parametro di output calcolato ai due livelli di dettaglio possa arrivare per alcuni edifici dell'area analizzata anche fino al 30 % con un valore medio compreso entro il 10 %. Nello studio è inoltre indicato come la modellazione al LOD1 e LOD2 siano le più frequenti nella pratica corrente.

2.5 Algoritmi per la ricerca della trasmittanza termica di involucro a partire da riprese termografiche

Le analisi di sensitività proposte al paragrafo 2.4 pongono una particolare attenzione sul tema dell'influenza della trasmittanza termica di involucro sui risultati finali della modellazione energetica; vi è stato dunque un approfondimento nella letteratura per ricercare una tecnica di indagine del costruito che consentisse di superare le criticità legate ad una non corretta valutazione delle performance di involucro.

L'impiego della termografia ha visto negli ultimi anni una sempre maggiore diffusione, vista le diverse applicazioni, la rapidità di acquisizione dei dati e lo sviluppo di tecnologie e apparecchiature sempre più compatte e a costi maggiormente accessibili. Uno degli impieghi della termografia consiste nella misura di alcune caratteristiche superficiali dell'involucro edilizio in modo da analizzare i processi di scambio termico. A titolo di esempio, la tecnologia in questione applicata alle costruzioni consente di individuare la mancanza o i difetti dell'isolamento termico, i ponti termici o i quadri umidi.

L'utilizzo più innovativo della termografia consiste nell'ottenimento di informazioni quantitative circa le caratteristiche di performance termiche dell'involucro edilizio con specifico riferimento alla determinazione della trasmittanza termica. Questo dato spesso non è disponibile perché la documentazione tecnica non è

accessibile o non è presente; l'uso della termografia, specie nell'ipotesi di applicazioni alla scala di distretto, rende rapida la ricognizione della trasmittanza termica degli edifici indagati e risulta particolarmente utile nell'ambito degli UESM di tipo bottom-up in cui è richiesta la conoscenza degli aspetti termofisici degli edifici analizzati.

Il tema della ricerca della trasmittanza termica dell'involucro edilizio può essere affrontato facendo ricorso:

- alla letteratura tecnica: ad esempio utilizzando indirettamente la UNI/TR 11552 [85] che riepiloga una serie di soluzioni costruttive tipiche dell'involucro edilizio;
- a prove distruttive ma queste sarebbero di difficile applicazione se relative ad un intero ambito urbano;
- a termoflussimetri [86], tale tecnica però richiede tempi di esecuzione lunghi, rappresenta una misura puntuale della trasmittanza termica (non considera ad esempio le anomalie locali) e produce risultati attendibili per chiusure opache a medio bassa inerzia termica che non superano spessori dell'ordine dei 50 centimetri.

Un approccio più innovativo per la determinazione della trasmittanza termica dell'involucro edilizio sta nell'uso della tecnica termografica Infrared Thermography Method - IRT e si differenzia dal metodo Heat Flowmeter Method - HFM per la breve durata di misurazione e per la possibilità di analisi di vaste aree di involucro edilizio.

I primi studi per la stima della trasmittanza utilizzando il metodo IRT sono stati condotti da Madding [87] e Albatici [88], seguiti da Fokaides e Kalogirou [89] e da Dall'O' [90].

Le relazioni analitiche messe a punto dai ricercatori si caratterizzano per il fatto che il calore trasferito dalla parete al sensore della termocamera è il risultato dovuto alla somma di una componente radiativa e di una convettiva.

Nello specifico, la relazione di calcolo per la stima della trasmittanza termica di involucro proposta da Madding [87] nel 2008 è la seguente:

$$U_{IRT-Eq.} = \frac{4\varepsilon\sigma T_m^3(T_{se} - T_{ref}) + h_c(T_{se} - T_e)}{T_i - T_e}$$

dove:

ϵ - rappresenta l'emissività termica della parete

σ - costante di Stefan Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$)

T_{se} - Temperatura superficiale esterna (K);

T_{ref} - temperatura riflessa (K);

T_m - temperatura media tra T_{se} e T_{ref}

h_c - coefficiente di scambio termico convettivo esterno ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)

T_i - temperatura interna (K)

T_e - temperatura esterna (K)

Nella relazione proposta, il numeratore rappresenta la somma dei contributi radiativi e convettivi mentre a denominatore è presente il differenziale tra temperatura interna ed esterna.

Altri studi, come quello di Fokaides [89], propongono una relazione che si differenzia dalla precedente in quanto a numeratore nella componente radiativa risulta al cubo non più la media tra la temperatura superficiale esterna e quella ambiente riflessa ma la temperatura superficiale della muratura T_w ; inoltre, la componente convettiva introduce il coefficiente liminare di scambio termico interno.

$$U_{MEAS} = \frac{[4\epsilon\sigma T_w^3(T_w - T_{REF}) + h_{IN}(T_w - T_{IN})]}{(T_{IN} - T_{OUT})}$$

Nella stessa ricerca, attraverso un'applicazione ad un caso studio costituito da un campione di edifici siti sull'isola di Cipro ritenuti rappresentativi delle tecniche costruttive locali, si è studiato l'errore nella stima della trasmittanza termica tra il metodo basato sulla termografia agli infrarossi e quello basato sul calcolo numerico descritto nella ISO 6946 [91]. Nello studio si sono analizzati i risultati relativi alle chiusure verticali opache e alle coperture: nel primo caso l'errore è stato sempre contenuto nel 10 %, nel secondo si è arrivati fino al 20 %.

Nello studio di Dall'O' [90] è proposta invece la relazione semplificata di seguito proposta in cui è presente a numeratore il coefficiente liminare di scambio termico esterno h_e al posto del coefficiente convettivo h_c ; secondo i ricercatori fin

tanto che la velocità del vento all'esterno della parete indagata è inferiore ai 2 m/s i due coefficienti sono simili.

$$U_{IRT-Eq.} = \frac{h_e(T_{se} - T_e)}{T_i - T_e}$$

La relazione di calcolo proposta da Albatici [88] è la seguente:

$$U = (5.7674 \epsilon_{tot} ((T_i/100)^4 - (T_{amb}/100)^4) + 3.8054v(T_i - T_{amb})) / (T_{int} - T_{amb})$$

ϵ_{tot} emissività sull'intero spettro (emissività integrale)

T_i – temperatura della superficie da indagare (K)

T_{amb} temperatura ambiente esterno (K)

v – velocità di convezione dell'aria

T_{int} – temperatura ambiente interno (K)

È richiesta la conoscenza:

- della temperatura dell'aria esterna e interna alle unità immobiliari;
- della temperatura dell'aria dell'ambiente esterno;
- dell'emissività termica delle pareti e la temperatura superficiale esterna.

Come riferito però da Albatici in [88] vi sono dei limiti:

- la misurazione dovrebbe essere effettuata preferibilmente durante la sera in modo da evitare la radiazione solare diretta;
- la velocità del vento deve essere inferiore a 1 m/s al fine di evitare eccessivi scambi termici convettivi;
- gli elementi edilizi devono aver assorbito sufficiente calore durante i giorni precedenti in modo da avere un flusso termico disperso misurabile;
- la differenza tra la temperatura interna ed esterna durante la misura deve essere di almeno 10 °C per consentire uno scambio termico valutabile attraverso l'elemento.

In genere, si stima come il valore della trasmittanza calcolato con il metodo IRT sia vicino a quello calcolato con il più accurato metodo HFM per pareti con medio-bassa inerzia termica e produce errori dell'ordine del 15-20 %.

Si evidenzia come nella metodologia di cui al presente contributo esposta nel capitolo 3 sarà adoperata la relazione di calcolo proposta da Albatici.

2.6 GeoBIM: un approccio integrato alla gestione di dati multipiattaforma BIM – GIS

Negli ultimi anni si sta diffondendo sempre più l'utilizzo di un approccio integrato alla gestione dei dati all'interno di sistemi multi-piattaforma capaci di integrare il modello BIM con le informazioni disponibili alla scala territoriale gestite all'interno di un sistema GIS. L'integrazione degli approcci alla progettazione o alla gestione dei dati va sotto la più generale disciplina del GeoBIM [92] che consiste nello studio delle aree urbane costruite in cui gli aspetti energetico-architettonici definiti in termini di BIM si completano con le informazioni geografiche del sito modellato all'interno di sistemi GIS.

Allo scopo di comprendere le peculiarità del GeoBIM è utile riferire gli aspetti essenziali che caratterizzano i due principali approcci alla gestione e pianificazione dei sistemi urbani (fig. 4): da una parte i sistemi BIM per le applicazioni di **progettazione** di organismi edilizi ed infrastrutture, **pianificazione** dei progetti, **assistenza** durante le fasi di costruzione e consegna dei lavori, **produzione** di documentazione tecnico economica; dall'altra i sistemi GIS, più utilizzati invece per le fasi di **pianificazione** alla scala urbana, **raccolta** e **gestione** dati riferiti a informazioni territoriali, **gestione** di regolamenti e delle autorizzazioni, in generale, **gestione** degli asset.

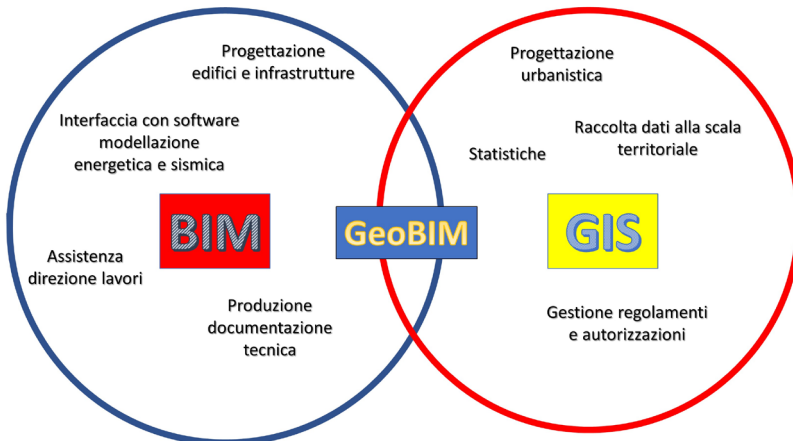


Figura 4 – Rappresentazione delle peculiarità del BIM e del GIS

In uno scenario internazionale caratterizzato da ingenti risorse spese nel parco edilizio per nuove costruzioni e per rigenerazioni urbane, il GeoBIM si pone da collante tra tecnologie diverse per la gestione dei dati basate su sistemi, e quindi su logiche di funzionamento, con finalità e peculiarità proprie.

Alla luce di quanto descritto, lo sforzo della ricerca scientifica da una parte e delle aziende produttrici di software dall'altra sta nella possibilità di sviluppare procedure metodologiche e quindi applicativi in grado di mettere a sistema le informazioni provenienti dai due approcci alla progettazione e pianificazione del territorio (il BIM e il GIS).

Dagli studi di Noardo [93] risulta che negli ultimi anni diverse sono state le applicazioni del GeoBIM per integrare le informazioni geografiche (GIS) con quelle relative agli edifici modellati secondo la logica BIM in ambiti che vanno dalla pianificazione urbana ai progetti infrastrutturali.

L'approccio GeoBIM porta con sé vantaggi in molti ambiti: pianificazione urbanistica, asset management di grandi portafogli immobiliari, gestione di grandi progetti, analisi dello stato di conservazione delle infrastrutture. L'approccio GeoBIM consente anche di integrare il modello d'informazioni geografiche relative al sito e di gestire le informazioni alla scala d'interesse per analisi di varia tipologia (ad esempio energetica, economica o ambientale).

In altri termini, come risulta dagli investimenti sempre maggiori volti alla digitalizzazione dei processi nel campo della produzione di modelli digitali del territorio, si potrebbe sintetizzare che il "il GIS fornisce conoscenza ulteriore al BIM e il BIM rafforza il GIS"; questa affermazione vuole alludere al fatto che il GIS propone il contesto reale in cui è inserito l'ambiente esistente all'interno del quale i vari attori coinvolti nel processo edilizio e di pianificazione e gestione del territorio possono attingere dati per esplorare, progettare, gestire e costruire; in questo modo il GIS fornisce conoscenza al BIM. A partire da queste informazioni è possibile utilizzare modelli avanzati tipici di un approccio BIM in modo che ne risulti, alla fine, una rappresentazione più accurata dell'oggetto, del fenomeno, del costruito, in generale di quanto modellato rispetto alla realtà. L'approccio GeoBIM consente una migliore

comprensione del mondo reale garantendo anche una maggiore efficacia dell'attività di pianificazione e progettazione del territorio.

Dalla consultazione del riferimento [94] risultano alcune applicazioni del GeoBIM di particolare interesse:

- all'interno della rete ferroviaria norvegese è adottato un modello di sovrapposizione tra le informazioni GIS georeferenziate relative ai percorsi ad alta velocità in progetto e i modelli BIM relativi alle proposte progettuali che integrano i vincoli esistenti lungo la rete; in questo modo è stato messo a punto uno strumento comune per la gestione del progetto, dei procedimenti autorizzativi e per la fase di costruzione di nuovi collegamenti su ferro;
- la città di Parigi ha avviato uno studio che parte dalla sovrapposizione tra informazioni cartografiche relative al rischio alluvioni e quelle morfologiche dell'abitato. Attraverso la messa a punto di modelli condivisi della conoscenza è stato possibile avviare vere e proprie simulazioni di scenari ipotetici di alluvioni quindi assumere decisioni nella gestione urbanistica e idraulica delle aree a rischio;
- altre applicazioni di interesse riguardano l'uso dei sistemi GeoBIM per l'effettuazione di simulazioni del traffico stradale; la logica è quella di sfruttare da una parte la rappresentazione BIM dell'area urbana insieme a modelli comportamentali del traffico in modo da avere a disposizione strumenti che consentono di gestire scenari progettuali secondo una logica "what if" ovvero ad esempio riuscire a prevedere in real-time quale è l'impatto dell'inserimento di un'intersezione stradale;
- valutazione e progetto di interventi di retrofit energetico degli edifici; la città di Washington DC ad esempio dispone di un sistema GeoBIM che consente di valutare a partire dalla sovrapposizione di dati GIS e modelli BIM esistenti, le aree urbane e il relativo consumo energetico annuale, insieme alle zone su cui valutare azioni di efficientamento energetico;
- progetto di infrastrutture ecologiche: la sovrapposizione dei modelli BIM del costruito insieme ai dati pluviometrici rinvenienti da misure locali può essere

utilizzato per il progetto di infrastrutture ecologiche verdi allo scopo di prevenire il rischio alluvioni.

Più in generale, dalla consultazione della letteratura di cui al riferimento [94] risultano, con particolare riferimento al GeoBIM nelle costruzioni, varie applicazioni:

- progettazione e validazione;
- supporto ai regolamenti nell'iter autorizzativo;
- gestione della logistica;
- supporto e gestione della fase di costruzione;
- gestione delle specifiche di progetto;
- supporto alle simulazioni (ambientali, energetiche, life cycle);
- supporto alla documentazione a corredo del progetto;
- supporto alla gestione degli asset immobiliari.

Le applicazioni del GeoBIM sono dunque largamente riconducibili al settore delle costruzioni come risulta dalla ricerca di Zhiliang [95]; in particolare rispetto al tema della pianificazione e del progetto di aree urbane sono di interesse:

- nello studio di Park [96] è presentato un approccio GeoBIM utile per la pianificazione del territorio di interventi di nuova costruzione, volto all'utilizzo combinato di modelli BIM, mappe GIS del sito, foto satellitari e dati catastali, con la finalità di supportare i progettisti nella scelta di collocazione dei volumi edificabili in modo da rendere i dati del territorio facilmente disponibili. Nel contributo è evidenziata inoltre la necessità di avere dati accessibili per favorire l'integrazione GeoBIM, infatti, se da una parte i modelli BIM sono spesso realizzati dagli stessi progettisti, la disponibilità di dati sul territorio è un aspetto gestito dagli enti o dalle utility di fornitura di servizi; la non disponibilità di dati open rischia di vanificare gli sforzi verso l'integrazione BIM-GIS;
- la ricerca presentata da Sergi [97] sfrutta l'integrazione GIS-BIM per supportare il progetto strutturale delle costruzioni, in particolare i dati sulla sismicità del territorio vengono dapprima importati nel sistema informativo e

poi integrati con i modelli BIM degli edifici, il tutto è poi esportato nel cloud per consentire a progettisti e collaudatori di analizzare la struttura;

- lo studio proposto da Deng [98] utilizza l'integrazione GIS-BIM a supporto della progettazione acustica degli spazi interni utilizzando le informazioni relative alle sorgenti di rumore mappate in ambiente GIS con il progetto architettonico degli edifici modellati in ambiente BIM dal quale si evincono le caratteristiche tecnologiche dell'involucro e la suddivisione dello spazio interno. La ricerca sfrutta l'integrazione tra dati descritti per mappare il rumore a livello 3D all'esterno e all'interno degli edifici attraverso il calcolo delle transmission loss (TL) e dei coefficienti di assorbimento delle strutture interessate. La ricerca in questione ha consentito di implementare in una piattaforma unica GIS 3D, ovvero un sistema GIS dotato di informazioni e dati nelle tre dimensioni, collegata al modello BIM dei singoli edifici, il modello di predizione sviluppato dal Consiglio Nazionale delle Ricerche Italiano - C.N.R. [99] capace di stimare il livello di rumore derivante dal traffico veicolare all'interno e all'esterno degli edifici;
- nella ricerca di Hjelseth [100] è proposto uno studio relativo alla costruzione di una piattaforma GeoBIM di supporto ai progettisti in grado di integrare i dati climatici del sito (formato GIS) con il progetto delle costruzioni (BIM). La ricerca attraverso delle simulazioni basate su dataset climatici esistenti consente di fare previsioni degli andamenti futuri supportando i progettisti negli scenari progettuali riducendo la sensibilità delle costruzioni verso i rischi legati al clima. Nello studio in questione si introduce il concetto di adattabilità climatica delle costruzioni e cioè il modello BIM è dotato di regole che, in funzione dell'andamento del clima, suggeriscono al progettista le azioni da intraprendere (predefinite in un database) per adeguare l'edificio all'evoluzione del clima.

Rispetto al tema della costruzione e gestione delle costruzioni (compreso il fine vita degli edifici) sono di interesse i seguenti studi:

- Irizarry [101] presenta un lavoro in cui l'integrazione BIM-GIS si è adoperata durante le fasi costruttive di manufatti edilizi per collegare gli aspetti esecutivi relativi alla realizzazione dell'opera con le informazioni sulla logistica e sui materiali da utilizzare, il tutto contenuto all'interno del sistema informativo GIS;
- nello studio proposto da Bianco [102] è previsto l'impiego combinato del BIM applicato ad alcune delle architetture rurali in pietra site in Italia insieme alle informazioni storiche a queste associate. Nello specifico la ricerca si concentra sugli edifici realizzati in pietra presso l'arco alpino sui quali è applicato dapprima il rilievo, poi la costruzione di modelli BIM, quindi la costruzione di sistemi informativi basati sulle informazioni georeferenziate con lo scopo di costruire un database unico degli edifici analizzati sui quali pianificare azioni e in generale politiche di promozione del territorio;
- Alsaggaf [103] presenta un approccio integrato all'uso di dati GIS relativi alla rete di trasporto locale con i modelli BIM degli edifici per la stima dei rifiuti conseguenti ad interventi di demolizione, l'eventuale differenziazione e la stima dei mezzi di trasporto necessari. La metodologia proposta in questo studio risulta di interesse per applicazioni in mega progetti in cui progettisti e direttori dei lavori si confrontano con la necessità di attuare stime accurate dei rifiuti che saranno prodotti. L'integrazione BIM-GIS consente di analizzare innumerevoli aspetti connessi con la gestione dei rifiuti all'interno di una piattaforma unica che tiene in conto tra gli altri aspetti: l'orografia del territorio, il numero di mezzi di trasporto necessari, l'eventuale nuovo utilizzo dei materiali da demolizione, questioni logistiche, impatti sul territorio.

La metodologia GeoBIM porta con sé i seguenti vantaggi principali:

- trasformazione del ciclo di vita del progetto: l'attività di progettazione deve confrontarsi con delle modifiche nel suo schema logico tradizionale e deve favorire sempre più i processi di scambio di informazioni tra i sistemi BIM e quelli GIS. Questa circostanza si traduce nello sforzo della ricerca e delle software house all'implementazione di utility e allo sviluppo di applicativi che consentono di gestire questo flusso di lavoro;

- il progetto e la costruzione sono sempre basati sul contesto reale: la metodologia GeoBIM obbliga i progettisti a inserire il progetto e di conseguenza l'oggetto edilizio da realizzarsi in contesti reali che possono essere meglio descritti già nelle prime fasi della progettazione attraverso il valore aggiunto fornito da dati di varia natura potenzialmente provenienti da ogni disciplina;
- l'approccio GeoBIM può contare su moderne tecnologie di rilievo in grado di rappresentare i contesti reali con livelli di accuratezza elevati e spesso anche in tempi rapidi; un'altra possibilità può essere quella di collegare lo scenario in cui si inserisce il progetto con un rilievo derivante da monitoraggi continui. Si pensi alle applicazioni possibili di analisi dell'erosione costiera e di conseguente aggiornamento dei database di conoscenza in real time;
- l'approccio GeoBIM può contare anche su piattaforme aperte ed espandibili: a seconda della scelta della tecnologia software da adoperare è possibile fare riferimento a formati open sia per lo scambio dei dati GIS che per lo scambio dei dati BIM;
- l'approccio GeoBIM è in grado di interfacciare il modello con database di dati misurati anche molto ampi i quali si possono potenzialmente comunicare con algoritmi di intelligenza artificiale;
- l'approccio GeoBIM si presta ad una semplificazione della rappresentazione del progetto essendo implicitamente incorporata sempre la visualizzazione 3D; si pensi a scenari di progetto molto complessi come tunnel ferroviari da analizzare contestualmente a rilievi geologici delle rocce, progetti urbani in cui si vuole mettere in evidenza le caratteristiche di radiazione solare incidente, scenari di simulazione del traffico e di gestione dei rischi (alluvione, sisma, forte vento, ecc.).

Un ulteriore aspetto di interesse a proposito del Geo-BIM consiste nel livello di maturità digitale del modello che si va a realizzare, come risulta dal riferimento bibliografico [104] in generale è possibile individuare i seguenti livelli in funzione dell'attività svolta:

- **reporting:** si tratta della funzione di storage dei dati del sistema con la finalità di consentire agli utenti la comprensione dell'oggetto costruito, di un fenomeno, di una simulazione;
- **analysing:** si tratta dell'introduzione nel sistema di routine di calcolo per l'analisi dei dati con la finalità, ad esempio, di valutare nel tempo l'evoluzione di un fenomeno o fornire dati sintetici;
- **predicting:** è un'ulteriore abilità del sistema finalizzata a fare delle previsioni circa l'andamento di un fenomeno a partire dai dati analizzati;
- **integrating:** il sistema GeoBIM, a questo livello, è in grado di arricchire la conoscenza dell'area urbana collegandosi alla sensoristica installata e aggiornare la propria base di conoscenza;
- **prescribing and autonomus decision:** è il livello più avanzato del modello digitale del sistema in grado di prescrivere agli utenti azioni da compiere (ad esempio suggerire quando intervenire con attività di manutenzione) e prevede l'impiego anche dell'intelligenza artificiale per l'analisi, la predizione e l'apprendimento.

Il GeoBIM indica la generale integrazione tra modelli BIM e informazioni georeferenziate generalmente disponibili all'interno di modelli GIS. In letteratura e nella pratica corrente esistono diverse modalità per raggiungere questa integrazione, in generale sono possibili i seguenti approcci:

- impiego di sistemi che centralizzano l'informazione all'interno di database: in questo caso vi è un sistema di archiviazione dati comune ai due sistemi (BIM e GIS) che serve a leggere le informazioni e consentirne eventualmente la scrittura. Attraverso questa logica generale è realizzata l'integrazione software tra ArcGIS [105] e Revit [106]. La procedura descritta porta alla creazione di un database di partenza all'interno del quale sono memorizzate una pluralità d'informazioni: dati sintetici caratterizzanti il tessuto edilizio costruito, dati di consumo energetico, risultati delle fasi progettuali di retrofit energetico, disponibilità di aree per l'installazione di sistemi solari fotovoltaici, sistema dei vincoli (architettonici e paesaggistici);

- impiego di sistemi che sfruttano tecnologie per la conversione dei dati da BIM a GIS o viceversa: il modello BIM viene convertito nel formato Industry Foundation Classes - IFC attraverso strumenti in grado di decodificarne la struttura, per poter essere poi utilizzato all'interno di applicazioni GIS [107]. La procedura è eseguibile all'interno di strumenti specifici che integrano dei linguaggi di programmazione basati su Visual Programming Language - VPL. La struttura del modello BIM convertito in IFC-file prevede una rappresentazione gerarchica ramificata dell'edificato in cui più in alto sono presenti gli edifici considerati come unità generali mentre più in basso per ciascuno di questi è individuata la suddivisione in piani costituenti con associata un'ulteriore ramificazione in unità tecniche quali murature, coperture, finestre, ecc. La VPL è una procedura scritta di programmazione visuale in grado di leggere questa ramificazione e trascriverla all'interno di formati standard tipici dei sistemi GIS come lo shapefile. Uno strumento esistente in grado di effettuare questa procedura è l'applicativo FME [108].

2.7 Valutazioni sullo stato dell'arte

La trattazione che segue è incentrata su alcune valutazioni sullo stato dell'arte presentato, le quali sono funzionali per la fase metodologica del presente lavoro di dottorato che è presentata nel successivo capitolo. Gli aspetti di oggetto di valutazione riguardano i seguenti argomenti:

- **analisi di sensitività:** le analisi di sensitività citate consentono di comprendere come nella modellazione energetica degli edifici particolare attenzione vada posta nella definizione di: temperatura dell'aria interna, trasmittanza termica di involucro opaco, dimensioni delle superfici disperdenti e tecnologia impiantistica di controllo del comfort termico. Parametri come il rapporto tra superfici trasparenti e opache WWR (per i climi temperati e per valori compresi tra il 20 % e il 40 %), la trasmittanza delle superfici trasparenti e il tasso di ricambio orario per ventilazione hanno effetti meno significativi nelle

analisi di sensitività analizzate. Con riferimento al WWR, si specifica che per l'ambito di applicazione del metodo (edilizia residenziale costruita tra il Secondo Dopoguerra e il 1990), il rapporto tra superfici finestrate e trasparenti è di solito contenuto nell'intervallo 20-40 %, coerentemente con i dispositivi normativi in tema di rapporti aero-illuminanti minimi vigenti nel periodo di interesse (Decreto Ministeriale Sanità del 1975 [109] e le Istruzioni Ministeriali del 1896 [110]).

Da questa considerazione ne discende come nella fase metodologica di rilievo vada posta particolare attenzione ad alcune tipologie di dati che è meglio determinare con misure dirette o in generale più accurate rispetto a valutazioni basate su scelte discrezionali o solo basate su letteratura.

In particolare, la letteratura presentata a proposito del calcolo della trasmittanza termica di involucro per mezzo della tecnica termografica sarà funzionale per la fase metodologica di rilievo delle performance energetiche di involucro presentata nel capitolo successivo.

Altri parametri caratterizzanti il comportamento dell'utente (profili di occupazione ed uso dello spazio, di apertura dei serramenti e di controllo degli impianti) saranno invece raccolti dalla letteratura scientifica o da indagini statistiche non essendo possibile applicare un rilievo sull'esistente se questo è molto ampio;

- **scelta della tipologia di UESM:** le città sono luoghi caratterizzati da una forte eterogeneità del costruito perché spesso realizzate in tempi molto lunghi (spesso secoli) con il succedersi di avanzamenti tecnologici relativi a sistemi costruttivi e impiantistici. Ne deriva che nell'analisi dei quartieri o distretti urbani è facile individuare una forte eterogeneità morfo tipologica, specie nelle aree esterne ai nuclei originari storici che con il succedersi di interventi di demolizione e ricostruzione, o in generale di ristrutturazione, hanno portato ad una forte diversificazione di tipologie e tecnologie edilizie. Di conseguenza,

nella scelta del tipo di UESM da applicare, si è preferito ricorrere per la valutazione delle caratteristiche fisiche degli edifici ad un approccio bottom-up > physical model ovvero basato sul rilievo diretto; un approccio basato sull'edificio archetipo richiederebbe la messa a punto di una notevole quantità di edifici di riferimento non essendo possibile, senza errori, ricondurre tutti gli organismi edilizi ad un solo tipo. L'approccio top-down è invece applicato per il rilievo di tutte quelle caratteristiche non facilmente individuabili nell'ambito di un rilievo come i profili di uso o la tecnologia impiantistica;

- **sistemi per il rilievo esteso alla scala urbana:** l'analisi della letteratura ha consentito di individuare come tecnologia di rilievo un possibile approccio misto che punti all'uso di database esistenti per metodologie di rilievo rapide e che applichi invece tecniche più accurate nella resa geometrica degli edifici (attraverso il ricorso alla tecnica fotogrammetrica o aerofotogrammetrica) nell'ambito di metodologie più dettagliate specie se finalizzate alla validazione dei risultati. Le scelte del metodo e della tecnica di rilievo rendono la proposta metodologica, specie nella sua applicazione al LOD1 e LOD1+, di tipo speditivo in quanto basata essenzialmente su dati provenienti da database o su semplice acquisizione di immagini contestuali nel visibile e nell'infrarosso termico. Il ridotto impiego di tempo e risorse su vaste aree d'indagine risulta fondamentale per la concreta applicabilità e spendibilità del metodo. Tempi e costi di acquisizione dei dati costituiscono proprio la principale difficoltà operativa nelle attività di audit finalizzate alla produzione dei piani energetici alla scala di quartiere o di comune.
- **scelta dei LODs:** la letteratura presentata evidenzia come, se anche è possibile una modellazione fino al LOD4, quest'ultima è di difficile implementazione essendo richiesti molti dati spesso di difficile reperimento. La metodologia messa a punto propenderà per un

generale uso del LOD1 essendo di più rapida implementazione e ricorrerà al LOD4 in particolar modo per la successiva fase di validazione della procedura.

Indipendentemente dal livello di dettaglio cui si ricorrerà nell'analisi, la metodologia implementa tutte le tipologie di dati richiesti per la modellazione energetica includendo anche aspetti che non afferiscono alla geometria, sono presi in esame anche le tecnologie impiantistiche, gli occupanti e il profilo d'uso dello spazio. Questi dati saranno individuati con tecniche e procedure caratterizzate da minore accuratezza con l'aumentare del LOD.

- **uso del GeoBIM:** da un punto di vista concettuale nell'ambito del presente lavoro si è optato per l'impiego del GeoBIM per rispondere alla necessità di collegare all'interno delle aree urbane le informazioni georeferenziate disponibili in vari formati e all'interno di applicativi diversi con il modello degli edifici realizzato secondo livelli di dettaglio variabili a seconda degli obiettivi finali. Come risulta dall'capitolo 3, i singoli dati di input per la modellazione provengono da fonti diversi, il GeoBIM diviene un collettore di informazioni ben organizzate da utilizzare, per le finalità del presente lavoro, per la modellazione energetica, ma in grado di essere adoperato anche per altri usi, tra cui l'asset management per il processo decisionale, le analisi di fattibilità tecnico-economica, le valutazioni ambientali.

Il GeoBIM inoltre richiama il concetto di modellazione informativa ovvero il processo di creazione del modello digitale per rappresentare lo spazio o un'entità con un livello di dettaglio adeguato allo scopo del modello. Nel GeoBIM si ritrovano quei vantaggi tipici della modellazione informativa: **la scalabilità** ovvero il requisito per cui il sistema, senza perdere la funzionalità per cui è stato progettato, riesce ad essere utilizzato sia in contesti di limitata estensione e sia in quelli più ampi gestendo un quantitativo di dati maggiore;

l'interoperabilità intesa sia tra differenti software ma anche rispetto a diversi approcci alla modellazione (da BIM a GIS o da GIS a BIM); la **modularità** ovvero la capacità di gestione di un sistema in moduli funzionali in grado di interagire tra loro mantenendo la loro indipendenza di utilizzo e di strutturazione dei dati.

Quanto alla tecnologia adoperata, si propenderà per l'uso di sistemi centralizzati basati su database comuni per lo scambio di informazioni. In questo modo si avrà a disposizione uno strumento open (il database) che potrà essere popolato da una pluralità di tipi di dati e ottenere modelli digitali le cui caratteristiche non coprano solo gli aspetti energetici degli edifici ma riguardano anche altre questioni, ad esempio quelle relative al sistema di vincoli eventualmente presente, ad aspetti autorizzativi, a quelli relativi alla sostenibilità ambientale, ecc..

3. METODOLOGIA

3.1 Inquadramento

La metodologia messa a punto è finalizzata alla caratterizzazione degli ambiti urbani costruiti a prevalenza residenziale e si compone di varie fasi, a partire da quella di rilievo, di modellazione geometrica ed energetica con lo scopo di estrarre dati di sintesi rappresentativi del contesto, fino alla costruzione del modello digitale georeferenziato (fig. 5).

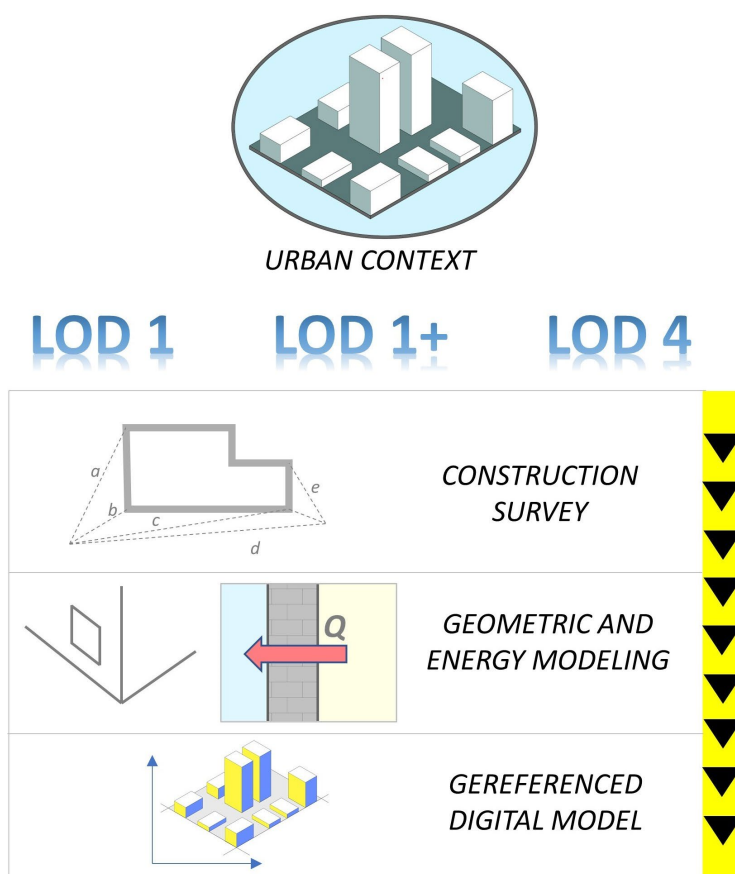


Figura 5 – rappresentazione grafica della metodologia sviluppata

Tale procedura, rispetto alla modalità e alle specifiche con le quali è proposta, costituisce elemento di innovazione nella ricerca scientifica ed è stata sviluppata secondo tre distinti livelli di approfondimento (LODs 1, 1+ e 4) prevedendo tecniche di rilievo, acquisizione dati e modelli di calcolo con finalità diverse tra loro. Il LOD 1 è quello più semplificato, pensato per ricognizioni rapide (metodo speditivo) alla scala di quartiere acquisendo tutti i dati di input a partire da database esistenti e prevede un modello di calcolo di rapida implementazione. Il LOD 4 rappresenta il tipo di modellazione più accurata sia per il tipo di rilievo (fotogrammetrico a doppia camera RGB - termografica) sia per il modello di calcolo energetico in regime dinamico (implementato in Energy+), ed è pensato per applicazioni su un numero più limitato di edifici o per supportare la fase di validazione. Infine, il LOD 1+ rappresenta una versione avanzata rispetto al LOD1, prevedendo l'integrazione di alcuni aspetti durante la fase di rilievo che conferiscono maggiore accuratezza al modello energetico oltre a rapidità di acquisizione dei dati.

La disamina di tutti i dati di input necessari per le varie modalità di analisi è affrontata ai paragrafi 3.2 e 3.3.

Si precisa che la ricerca, attraverso la presentazione dei LODs, punta a decodificare tutti gli aspetti collegati con il tema della modellazione energetica alla scala urbana; la struttura per LODs 1-4 ricalca quanto esposto nella letteratura per i soli aspetti geometrici, ma si differenzia per aver coinvolto nella descrizione per livelli di sviluppo gli aspetti relativi a tecnologie di involucro ed impiantistiche, i profili di uso e occupazione dello spazio, l'illuminazione, l'uso di apparecchiature e la ventilazione degli spazi indoor. Ciascuno di questi aspetti, insieme a quelli geometrici, è stato presentato attraverso una disamina dettagliata dei dati di input esposta sotto forma di matrice (allegati 1-2) in cui sono esposti per il LOD1 e il LOD4 secondo la struttura riferita nella tabella 2 che segue: le tipologie e le specifiche dei dati di input richiesti; il riferimento alle tabelle riportate nell'allegato 3 in cui sono sintetizzati alcuni dati utili alla modellazione tra cui quelli relativi alla tecnologia di involucro e impiantistica, al periodo costruttivo, ai profili di occupazione ed uso dello spazio; gli effettivi valori

attribuiti nell'ambito della modellazione applicata al caso di studio 2 esposto nel capitolo 5.

Tabella 2 – Struttura degli allegati 2 e 3

	LOD1	LOD4
Aspetti generali	Tipologia di dato di input	
Aspetti temporali	↓	
Dati meteoclimatici	Dato di input richiesto	
Dati geometrici	↓	
Modello energetico subsistema edilizio	Riferimento alla tabella contenente la selezione di dati richiesta	
Modello energetico subsistema impianti	↓	
Profili di occupazione	Specifica del dato per il caso studio 2 (capitolo 5)	
Illuminazione artificiale		
Dotazione e uso apparecchiature elettriche		
Ventilazione naturale		

La metodologia è applicabile in ambiti urbani ricadenti nei contesti consolidati o di espansione meno recenti, caratterizzati da scarse performance energetiche e quindi bisognosi di adeguate azioni di retrofit. Nello specifico ci si riferisce ai contesti urbani caratterizzati dalla presenza di edifici per lo più residenziali costruiti nel periodo tra il secondo Dopoguerra, contraddistinto per la Ricostruzione e per l'espansione dei centri urbani, e gli anni '90, periodo in cui fu emanata la Legge n.10/1991 [14], successiva ad altri dispositivi normativi come la Legge 373/1976 [111], che segnò l'inizio, almeno nella fase progettuale, dell'attenzione verso la questione del risparmio energetico e di maggiore efficienza degli edifici.

Gli ambiti urbani cui ci si riferisce sono quelli tipicamente presenti nell'area esterna ai centri storici ricadenti nelle zone "a griglia" o a "maglia ortogonale", normalmente appartenenti alle zone territoriali omogenee di tipo B (città consolidata) degli strumenti urbanistici, o di tipo C di espansione meno recente.

In figura 6, a titolo di esempio, è rappresentata una cartografia della città di Andria (BT) in cui è evidenziata la concentrazione di edifici costruiti nel periodo dal Secondo Dopoguerra al 1970, insieme ad alcuni tipici esempi della città consolidata a maglie ortogonali. L'immagine mostra una significativa eterogeneità del tessuto urbano del caso esaminato: attorno all'area del centro storico (centrale) e lungo

alcune direttrici stradali principali, vi è maggiore presenza di edifici (nella mappa con colore più scuro) tipici dei contesti urbani oggetto di interesse.

Gli ambiti urbani in esame, considerata l'ampia durata del periodo storico considerato (1945 – 1990), valutata altresì l'innovazione tecnologica che ha inciso sulle tecniche costruttive e sugli impianti, porta a dover identificare i contesti considerati come caratterizzati da una forte eterogeneità morfologica, tipologica e tecnologica.

A livello italiano, a conferma dell'eterogeneità dei contesti urbani presi in esame, va tenuto in conto che proprio a cavallo tra il Secondo Dopoguerra e i primi anni '90 hanno visto la luce i primi strumenti urbanistici, originariamente previsti dalla legge n. 1150/42 [112], ma che in genere hanno previsto lunghi tempi di attuazione. Si segnala inoltre come nel frattempo sono anche intervenute leggi straordinarie, tra cui la Legge n°765 del 1967, nota come Legge Ponte [113]. Il risultato è stato che spesso gli strumenti urbanistici intervenivano all'interno di aree in cui vi era già presenza di aree edificate secondo logiche, morfologie e tecnologie diverse da quelle che poi si proponevano all'interno dei piani urbanistici.

Tali questioni qui esposte sono state attentamente valutate nella individuazione dell'UESM da impiegarsi; infatti, allo scopo di non rinunciare alla più appropriata resa della fisica degli edifici, non essendo questi riconducibili ad un unico archetipo, per la descrizione degli aspetti morfotipologici e tecnologici si è optato per un approccio bottom-up basato sul modello fisico a singola o multi zona; per la ricognizione degli aspetti più facilmente gestibili con le tecniche di indagine statistica (popolazione residente, profili di uso dello spazio, tecnologie impiantistiche installate, ecc.) si è utilizzato invece l'approccio top down.



Figura 6 – per la città di Andria (BT) in alto un esempio di città consolidata a maglie ortogonali (fonte: Google Earth), in basso la concentrazione degli edifici costruiti tra il Secondo Dopoguerra e il 1970 (fonte: elaborazione eseguita a partire dai dati del 15° censimento Istat popolazione e abitazioni 2011)

3.2 Presentazione dei LODs – parte 1

Questa fase della ricerca anticipa e inquadra la parte di modellazione energetica della metodologia proposta; nello specifico è presentato lo studio condotto per riepilogare, in maniera generale, i dati necessari per descrivere ai vari LODs l’ambito urbano di interesse.

Si precisa, inoltre, che quanto esposto nel presente paragrafo rappresenta un indice di quanto sviluppato in forma più approfondita nel successivo che è dedicato esclusivamente ai LODs 1, 1+ e 4 per i quali, nella rappresentazione sotto forma di

matrici esposte negli allegati 1-2, sono riepilogati i singoli dati di input esponendo (in forma tabellare) anche possibili valori alfa numerici attribuibili (allegato 3).

La disamina che segue si concentra per i vari livelli LODs non solo sui dati geometrici necessari alla descrizione dell'ambito urbano, così come di solito è presentata nella letteratura, ma coinvolge anche ulteriori aspetti relativi alla caratterizzazione termofisica dell'edificio, agli aspetti tecnologici impiantistici, ai profili di occupazione ed uso dello spazio, all'illuminazione, all'uso di apparecchiature domestiche e alla ventilazione naturale.

Come si ha modo di vedere dalla lettura della tabella 1, la matrice presenta una suddivisione in colonne relative ai n.4 LODs (1, 2, 3 e 4) e in righe relative alle n.12 tipologie di dati analizzati. L'approccio adottato ha previsto l'impiego di dati ottenibili da modelli esistenti o database per i LODs 1 e 2 in modo da rendere il metodo di rapida implementazione; si ricorre alla tecnica di rilievo in situ o all'analisi documentale per i LODs 3 e 4, essendo questi modelli più raffinati e più improntati, come si vedrà nel seguito, alla validazione dei risultati.

Si evidenzia inoltre che nella matrice, all'interno delle celle relative ai dati di input sono richiamati tra parentesi quadre il dato di partenza necessario per il calcolo. Le variabili indipendenti più volte richiamate nella matrice come dato di partenza sono evidenziate in rosso nella seconda colonna e sono intese come dati essenziali per la costruzione del modello: destinazione generale, località, periodo e anno di costruzione, altezze e superfici, numero di occupanti.

Si espone dunque la tipologia di dati analizzati, cercando per ciascuno di fornire alcune indicazioni utili e rimandato alla lettura delle singole celle della matrice riportata in tabella 3 per il dettaglio:

1. **aspetti generali:** sono trattati aspetti relativi alla destinazione generale, al numero di unità immobiliari presenti (dato non considerato fino al LOD 3), alla località geografica e alla tipologia e tecnologia costruttiva;
2. **aspetti temporali:** si analizzano dati relativi al periodo di costruzione che è determinato ai livelli più bassi a partire da indagini statistiche mentre si ricorre all'analisi documentale delle licenze edilizie per il LOD4 da cui risultano anche

aspetti relativi all'eventuale esecuzione di lavori edili per ampliamenti o ristrutturazioni;

3. **dati meteoroclimatici per valutazioni standard:** si fa riferimento, per il LOD 1 ai dati meteo relativi alle stazioni meteo di riferimento per le città, mentre per i LODs 2, 3 e 4 ai dati meteo della località climatica esposti nella forma dell'anno tipo.
4. **dati meteoroclimatici per diagnosi energetiche:** si utilizzano i dati reali misurati valutati, per il LOD1 rispetto alle stazioni meteo di riferimento per le città, per i LODs 2, 3 e 4 facendo ricorso alle singole località climatiche;
5. **dati meteoroclimatici per misure locali:** in questo caso è previsto l'impiego di dati da misure locali per i LODs 3 e 4 essendo questi interessati dall'adozione della tecnica termografica per la misura della trasmittanza termica;
6. **dati geometrici:** in questo caso sono adottate tecniche più accurate per la determinazione di altezze e superfici basate sul rilievo in situ per il LODs 3 e 4, mentre è previsto il ricorso a database esistenti per la rappresentazione semplificata del costruito per i LODs 1 e 2;
7. **modello energetico (sub sistema edilizio):** è prevista la caratterizzazione del modello attraverso l'analisi della documentazione tecnica per il solo LOD 4. Nello stesso livello si impiegano le riprese termografiche per la stima della trasmittanza termica.
8. **modello energetico (sub sistema impianto):** la rappresentazione dell'impianto termico è semplificata per i LOD 1, 2 e 3, prevedendo il ricorso ai soli dati disponibili da indagini statistiche e database esistenti; al LOD 4 si fa ricorso ai dati disponibili nelle relazioni tecniche degli elaborati di progetto;
9. **profili di occupazione:** il numero di occupanti è determinato al LOD 1 e 2 a partire dai criteri riferiti nella ISO 13790 che correlano volume o superfici al numero di abitanti equivalenti. Al LOD 3 e 4 è previsto il ricorso alle sezioni di censimento per calcolare in maniera accurata il numero di abitanti presenti. Per quanto riguarda i profili di occupazione, per il LOD 1 e 2 sono adottati quelli riferiti nella ISO 13790 mentre ai LOD 3 e 4 si fa riferimento alla

pubblicazione scientifica riportata in [80] che definisce per la residenza, a partire dall'analisi di dati statistici, i profili di uso dello spazio in funzione dell'attività svolta. L'utilizzo di questo tipo di fonte, applicabile per le sole abitazioni, è compatibile con gli obiettivi del lavoro che è volto all'analisi per finalità energetiche delle aree a prevalenza residenziale; altre destinazioni d'uso eventualmente presenti nelle applicazioni reali del metodo saranno trascurate solo se ritenute scarsamente significative, per queste infatti sarebbe difficile stimare un profilo di uso dello spazio, essendo in genere poco standardizzabile.

10. **illuminazione artificiale:** si impiega la norma ISO 13790 per la definizione della potenza (W/m^2) da associare alla residenza insieme ai profili di utilizzo comuni a tutti i LODs.
11. **dotazione ed uso di apparecchiature:** si ricorre alla norma ISO 13790 per la definizione della potenza (W/m^2) da associare alla residenza insieme ai profili di utilizzo comuni a tutti i LODs.
12. **ventilazione naturale:** si ricorre all'approccio basato sull'aria minima di rinnovo per tutti i LODs in questione.

Tabella 3 – 1. Indicazione dei dati di input ai vari LODs: aspetti generali, temporali, meteoroclimatici

		LOD 1	LOD 2	LOD 3	LOD. 4
1. aspetti generali	1.1 destinazione generale	da sezioni di censimento ISTAT		da sezioni di censimento ISTAT/da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ	
	1.2 n.ro unità immobiliari presenti	N.C.			da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ
	1.3 località/area geografica	coordinate geografiche da S.I.T.			
	1.4 tipologia e tecnologia costruttiva	funzione del periodo costruttivo [2.1]		funzione del periodo costruttivo [2.1], da rilievo in situ	funzione del periodo costruttivo [2.1], da rilievo in situ, analisi documentale
	1.5 aspetti normativi	legislazione vigente funzione periodo costruttivo [2.1]		legislazione vigente funzione periodo costruttivo [2.1] / prescrizioni specifiche da analisi documentale	
2. aspetti temporali	2.1 periodo/anno di costruzione	da sezioni di censimento ISTAT		da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio) / da rilievo in situ	
	2.2 incremento volume	N.C.			
	2.3 retrofit energetico/ ristrutturazioni	N.C.			
3. dati meteoroclimatici (valutazioni standard)	3.1 T, UR, v, I. ecc	stazione meteo di riferimento (città) - anno tipo	località climatiche - anno tipo		
4. dati meteoroclimatici (diagnosi energetica)	4.1 T, UR, v, I. ecc	stazione meteo di riferimento (città) - anno dati consumo	località climatiche - dati consumo		
5. dati meteoroclimatici (termografie)	5.1 T, v	N.C.		misura in situ	misura in situ

Tabella 3 – 2. Indicazione dei dati di input ai vari LODs: aspetti geometrici

6. dati geometrici	6.1 altezza complessiva	rappresentazione da S.I.T. / dati satellitari (Open Street Map)	da rilievo in situ	da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ
	6.2 superficie di piano			
	6.3 chiusura verticale opaca			
	6.3.1 chiusura verticale trasparente	WWR da dati satellitari (Open Street Map)		
	6.4 profondità corpo di fabbrica	rappresentazione da S.I.T. / dati satellitari (Open Street Map)	da rilievo in situ	da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ
	6.5 chiusura di copertura			
	6.6 chiusura orizzontale di base			
	6.7 superfici involucranti non riscaldate	N.C.	da rilievo termico	
	6.8 altezza di interpiano media	ipotesi piano tipo (2.8-3 m)	da rilievo (fotografico/Google Maps)	da catastale/da rilievo (in situ, fotografico, Google Maps)
	6.9 numero di piani	si considera H tot [6.1] /h interpiano [6.8]	da rilievo (fotografico/Google Maps)	da catastale/da rilievo (in situ, fotografico, Google Maps)
	6.10 suddivisione spazio interno	N.C.		da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ
	6.11 schermature solari fisse	N.C.	da rilievo (in situ, fotografico, Google Maps)	
6.12 vol. non risc. (incluso l'interrato)	N.C.		da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ	

Tabella 3 – 3. Indicazione dei dati di input ai vari LODs: modello energetico subsistema edilizio

7. modello energetico subsistema edilizio	7.1 zone termiche (riscaldare)	singola zona		multizona
	7.2 chiusura verticale opaca	secondo UNI/TR 11552 [1.3 contesto geografico, 2.1 periodo costruttivo, 1.4 tipologia e tecnologia costruttiva]	da rilievo termico / da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ	
	7.3 chiusura orizzontale di base		da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ/ documentazione fotografica	
	7.4 chiusura orizzontale di copertura			
	7.5 chiusure trasparenti (telaio, vetro)			
	7.6 stratigrafia partizioni interne	N.C.		
	CAPACITA' DI ACCUMULO	//		
	7.7 globale	ISO 13790 - Modello 1 C - 5 R (sup.climatizzata coincidente con 6.2 sup. lorda)	//	
	7.8 chiusura verticale esterna	secondo UNI/TR 11552 [1.3 contesto geografico, 2.1 periodo costruttivo, 1.4 tipologia e tecnologia costruttiva]	da modello energetico	
	7.9 chiusura orizzontale di base			
	7.10 chiusura orizzontale di copertura			
7.11 interna	N.C.			

Tabella 3 – 4. Indicazione dei dati di input ai vari LODs: modello energetico subsistema impianti

8. modello energetico subsistema impianti	8.1 tipologia e modalità di gestione (autonomo/centralizzato)	fonte (ENEA, TABULA, Istat) [1.3 contesto geografico, 2.1 periodo costruttivo]**non sempre disponibile perché funzione dell'area geografica e della tecnologia costruttiva, in questi casi si ricorre ai rendimenti stagionali della UNI TS 11300**	su elaborazioni dati enea/istat/ rilievo termico/disponibilità di informazioni sulle reti	da rilievo termico/analisi documentale (APE, L.10, rel. Energ.)/rilievo a campione
	8.2 rendimento globale medio stagionale		N.C.	N.C.
	8.3 tipologia sistema di generazione		su elaborazioni dati enea/istat/ rilievo termico/disponibilità di informazioni sulle reti	analisi documentale (APE, L.10, rel. Energ.)/analisi fotografica
	8.4 specifiche sistema di generazione	N.C.	UNI TS-11300-2 (prosp.25-29) - UNI TS 11300-4	UNI TS-11300-2 (prosp.25-29) - UNI TS 11300-4, analisi documentale (APE, L.10, rel. Energ.)
	8.5 tipo e specifiche sistema di distribuzione	N.C.	UNI TS-11300-2 (prosp.21-23)	UNI TS-11300-2 (prosp.21-23), analisi documentale (APE, L.10, rel. Energ.)
	8.6 tipo e specifiche sistema di emissione	N.C.	UNI TS-11300-2 (prosp.17-18) [6.8 altezza interpiano]	UNI TS-11300-2 (prosp.17-18) [altezza interpiano], analisi documentale (APE, L.10, rel. Energ.)
	8.7 tipo e specifiche di controllo climatico	per tipologia impianto autonomo/centralizzato (per definire la Tset point) [2.1 periodo storico]	UNI TS-11300-2 (prosp.20)	UNI TS-11300-2 (prosp.20), analisi documentale (APE, L.10, rel. Energ.)
	8.8 ACS	consumi e specifiche secondo UNI TS-11300	consumi e specifiche secondo UNI TS-11300 / analisi documentale (APE, L.10, rel. Energ.)	
	FONTI RINNOVABILI	dati satellitari (frequenza aggiornamento 1-2 anni)	dati satellitari/analisi documentale	
	8.9 termiche	N.C.		analisi documentale (APE, L.10, rel. Energ.)
	8.10 elettriche	N.C.		
	8.11 consumi elettrici	a livello di cabina	smart metering	smart metering
8.12 consumi gas	N.C.	smart metering	smart metering	

Tabella 3 – 5. Indicazione dei dati di input ai vari LODs: profili di occupazione, illuminazione, apparecchiature elettriche, ventilazione

9. profili di occupazione	9.1 densità di occupazione spazio	N.C.		[numero occupanti]/[sup. vani]
	9.2 destinazione d'uso di zona/vano	N.C.		analisi documentale
	9.3 eventuali suddivisioni (nuclei famigliari/ aree funzionali)	N.C.		analisi documentale
	9.4 numero di occupanti (settore residenziale)	30 m2 per persona - ISO 13790	da sezioni di censimento ISTAT/affollamento standard medio per superfici [6.2]	da sezioni di censimento ISTAT/affollamento standard per destinazione d'uso [6.2]
	9.5 profilo di occupazione spazio (settore residenziale)	ISO 13790 - appendice G.12 (tempo di presenza giornaliero medio) [1.1 destinazione d'uso]		da indagini statistiche riportate in letteratura
	9.6 tasso metabolico/attività svolta	ISO 13790 - appendice G.12 (flusso termico medio per persona) [9.4 numero occupanti]		
10. illuminazione artificiale	10.1 tipologia sistema di illuminazione	analisi stative ISTAT (sezione-Energia)/letteratura (progetto EURECO)		
	10.2 densità di luce (W/m2)			
	10.3 programma di funzionamento			
11. dotazione e uso di apparecchiature elettriche	11.1 apporti interni (W/m2)			
	11.2 programma di funzionamento			
12. ventilazione naturale	12.1 modalità attuazione ventilazione	aria minima di rinnovo		
ventilazione meccanica		N.C.		
raffrescamento		N.C.		

Quanto ai dati di output, il principale parametro preso a riferimento è la portata termica al generatore (kWh/anno) ottenuto dal rapporto tra il fabbisogno di energia utile calcolato e il rendimento globale medio stagionale ottenuto come prodotto dei rendimenti dei vari sottosistemi dell'impianto. Questi rendimenti sono determinati a partire dai prospetti della UNI-TS 11300-2 [114] e in parte sono calcolati a partire da schemi tipo di impianto.

3.3 Presentazione dei LODs – parte 2 (LOD1, LOD4 e LOD1+)

La metodologia proposta è strutturata in tre fasi principali: rilievo, modellazione geometrica ed energetica, ciascuna da condursi secondo tre diversi livelli di sviluppo: LOD1, LOD1+ e LOD4; per finire con la costruzione del modello digitale georeferenziato.

Nel LOD1 vi è l'applicazione della metodologia messa a punto con lo scopo di ottimizzare i tempi per il rilievo ed arrivare a dei risultati sintetici rappresentativi del contesto in esame; il rilievo avviene utilizzando le informazioni già disponibili in database esistenti costruiti generalmente sfruttando dati satellitari; l'analisi dell'area avviene per lo più utilizzando dati reperibili da indagini statistiche o di letteratura; la modellazione energetica invece si svolge attraverso il modello di calcolo 5R1C (5 resistenze e 1 capacità) descritto nella ISO 13790 [79] implementato nell'applicativo CEA – City Energy Analyst [58].

Il LOD4 invece si caratterizza per un maggior numero di passaggi, descritti in figura 7; la prima fase si riferisce ai sub-processi di rilievo fotogrammetrico e di costruzione della nuvola di punti mediante software Structure from Motion - STM. Un elemento di innovazione della metodologia proposta è rappresentato dall'utilizzo combinato di strumentazione per il rilievo nello spettro del visibile e dell'infrarosso termico, allo scopo di costruire una doppia nuvola di punti con il principale vantaggio di caratterizzare l'edificio sia dal punto di vista geometrico (impiegando l'informazione RGB) che termofisico (impiegando l'informazione relativa all'infrarosso) utilizzando il medesimo rilievo. Inoltre, va precisato che l'informazione termica può essere impiegata per caratterizzare meglio il rilievo geometrico ovvero ad esempio per rilevare le superfici vetrate o per distinguere le zone riscaldate da quelle non riscaldate.

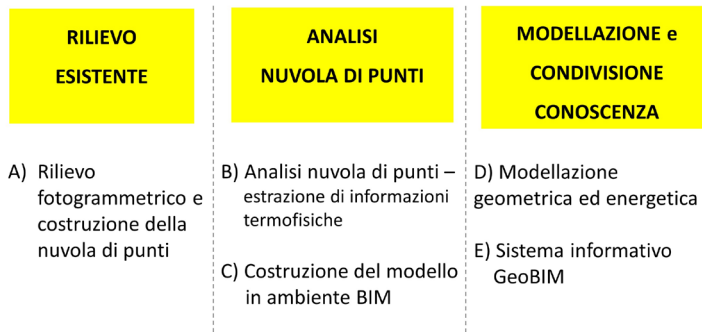


Figura 7 – Rappresentazione delle fasi della metodologia UESM – LOD4

La fase successiva è quella di analisi della nuvola di punti dalla quale deriva come output una nuvola di punti categorizzata ovvero uno spazio virtuale 3D nel quale sono identificate, per le finalità di modellazione energetica, le regioni dotate di caratteristiche omogenee (murature, superfici finestrate, schermature, ecc.); la nuvola di punti etichettata sarà oggetto di successive elaborazioni per la costruzione del modello BIM dell’ambito edilizio indagato. Tale procedura è da condursi all’interno di software dedicati per la gestione delle nuvole di punti; sono previsti i seguenti passaggi: importazione della nuvola di punti categorizzata, esportazione delle regioni solide, costruzione degli oggetti BIM, esportazione nel formato standard gbXML per la fase di analisi energetica. Segue la fase di modellazione energetica, eseguita in regime dinamico all’interno di Energy+.

La modellazione al LOD1+ è identica a quella proposta nel LOD1 con le seguenti eccezioni:

- la ricognizione delle geometrie esistenti sfrutta il rilievo fotogrammetrico tipico del LOD4;
- l’individuazione del rapporto WWR per ciascun prospetto è effettuata a partire dal rilievo fotogrammetrico, servendosi in particolare del rilievo termico essendo semplificata l’attività di ricerca del differenziale termico tra superfici finestrate e superfici opache;
- l’individuazione della trasmittanza termica avviene a partire dall’applicazione degli algoritmi di correlazione tra la temperatura

superficiale di involucro e la trasmittanza termica ovvero mediante l'analisi delle riprese termografiche.

La modellazione al LOD1+ nasce con lo scopo di mantenere la metodologia di rilievo del tessuto edilizio esistente di rapida implementazione cercando tuttavia di soffermare l'attenzione sugli elementi come la corretta resa delle geometrie e la trasmittanza per i quali le analisi di sensitività analizzate confermano la loro importanza in termini di peso sul risultato di output. Anche se le analisi della letteratura non hanno attribuito un'importanza primaria al rapporto WWR, al LOD1+ si è adottato il rilievo termico per individuare rapidamente le superfici finestrate quindi attribuire in maniera analitica il WWR senza fare riferimento a dati ipotizzati che indurrebbero una semplificazione inutile visto che il rilievo fotogrammetrico è da eseguirsi al LOD proposto.

3.3.1 LOD1– Matrice di riferimento dati di input

La modellazione dell'area urbana al LOD1 è da condursi a partire dalla matrice di calcolo esposta nell'allegato 1 messa a punto con la finalità di individuare i parametri di input da utilizzare per la fase di modellazione energetica. Tale matrice ricalca la struttura di quella generale di inquadramento proposta in tabella 1 al paragrafo 3.2, con degli approfondimenti per ciascuno dei dati di input.

3.3.1.1 Modello di calcolo LOD1

Il modello di calcolo implementato al LOD 1 è quello a n.5 resistenze e n.1 capacità descritto nella ISO 13790 la cui struttura è riepilogata nella figura che segue.

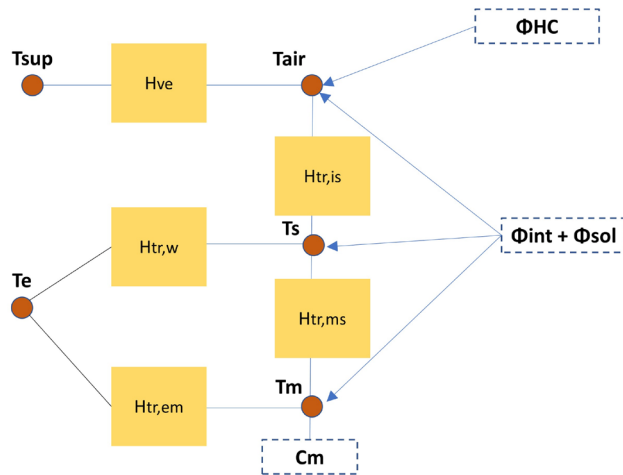


Figura 8 – rappresentazione grafica a partire dal modello di calcolo energetico 5 resistenze 1 capacità 5R1C della UNI EN ISO 13790

Dove:

T_{air} - Indoor air temperature

T_s - Envelope internal surface temperature

T_m - Building mass temperature

T_{sup} - supply air temperature

T_e - external air temperature

Φ_{HC} - Heating or cooling demand

Φ_{INT} - Internal contributions

Φ_{SOL} - Solar contributions

5R:

Hve - Heat transfer by ventilation

Htr,w - Heat transfer through windows

Htr,ms/em - Heat transfer through opaque component (ms - conductance/em - emission)

Htr,is - Heat transfer between the internal surface of walls and air temperature

1C:

C_m - Thermal capacitance of entire building

Il modello è basato sul bilancio energetico della zona termica il cui comportamento è assimilato a quello di un circuito elettrico; la logica è quella di avere un'unica capacità termica rappresentativa di tutto l'edificio e n.5 resistenze rappresentate dalle dispersioni dovute alla ventilazione, alla trasmissione attraverso involucro opaco e trasparente.

L'algoritmo restituisce come output l'energia da fornire al sistema data dal bilanciamento tra il calore da immettere (attraverso l'impianto e gli apporti gratuiti) e quello dovuto alle dispersioni termiche.

Il modello descritto è implementato nel software di simulazione energetica applicata alla scala urbana CEA – City Energy Analyst utilizzato per le analisi di cui al presente lavoro. La scelta di adoperare questo tipo di software per la modellazione al LOD1 e LOD1+ deriva da diverse valutazioni: in primo luogo si tratta di uno strumento che implementa un modello di calcolo basato sulla ISO 13790 e questo conferisce maggior facilità di decodifica della struttura del modello in quanto basato su uno standard internazionale; in secondo luogo il software presenta delle procedure automatiche di importazione delle geometrie a partire dal database Open Street Map che facilitano molto l'introduzione dei volumi corrispondenti agli edifici oltre a limitare il rischio di errore tipico delle procedure manuali di importazione di geometrie da altri applicativi e con altre estensioni; inoltre, l'applicativo dispone di funzioni che consentono di esportare con formati open i database contenenti tutte le caratteristiche dell'area oggetto di studio, in questo modo si ha la possibilità di operare mediante software di compilazione automatica degli attributi oltre ad avere controllo sui dati da inserire.

3.3.2 LOD4– Matrice di riferimento dati di input

La modellazione dell'area urbana al LOD4 è da condursi a partire dalla matrice di calcolo esposta nell'allegato 2 messa a punto con la finalità di individuare i parametri di input da utilizzare per la fase di modellazione energetica. Tale matrice ricalca la struttura di quella generale di inquadramento proposta in tabella 1 al paragrafo 3.2, con degli approfondimenti per ciascuno dei dati di input. Si precisa che

la costruzione del modello energetico seguirà gli opportuni approfondimenti definiti al paragrafo 5.3.4, in funzione del caso studio, allo scopo di valutare le modalità migliori di suddivisione dello spazio in zone termiche (una o più zone per ciascuna unità immobiliare).

3.3.2.1 Rilevo fotogrammetrico combinato e costruzione doppia nuvola di punti

La metodologia proposta per la fase di rilievo, descritta anche nel riferimento [115], prevede l'esecuzione del rilievo fotogrammetrico e la costruzione della doppia nuvola di punti. Per nuvola di punti si intende un modello costituito da una moltitudine di punti a ciascuno dei quali sono associate le coordinate di posizionamento spaziale rispetto ad un opportuno sistema di riferimento insieme ad altre informazioni come il colore, l'intensità di radiazione solare, la temperatura, ecc..

La fase di raccolta dei dati avviene mediante il rilievo fotogrammetrico degli edifici oggetto di indagine mediante una tecnica multi-sensore che prevede l'utilizzo combinato di una doppia camera di ripresa: una fotocamera RGB e una termocamera.

Il primo output che si ottiene dal rilievo sono gli scatti singoli ottenuti dai dispositivi in questione poi elaborati all'interno di software di calcolo StM (Structure from Motion) in grado di realizzare nuvole di punti ovvero spazi 3D costituiti di punti coordinati.

La fase di rilievo è assistita dall'uso di target di posizionamento (fig. 9) posti sugli edifici da indagare. Tali dispositivi di supporto al rilievo sono costituiti da cartelli realizzati dalla combinazione di due materiali e cioè carta in alluminio riflettente e nastro nero. L'uso dei due materiali sui target di posizionamento consente di rendere facilmente riconoscibili tali supporti all'interno delle riprese termiche spesso di più complessa interpretazione a causa della resa in scala di falsi colori in cui è possibile non riconoscere adeguatamente gli oggetti ripresi.

Si precisa che durante il rilievo, per definire le caratteristiche energetiche dell'involucro edilizio e stimarne la trasmittanza termica si rende necessario acquisire i dati relativi alla velocità del vento (mediante anemometri) e alla temperatura dell'aria

esterna (mediante data logger) in prossimità dell'edificio da indagare. In funzione dell'ampiezza e della complessità dell'area da rilevare oltre che dei fenomeni locali legati al microclima, andranno determinati i punti più opportuni per la misurazione da eseguirsi contestualmente con le attività di rilievo fotogrammetrico.

La fase successiva consiste nella costruzione ed analisi delle nuvole di punti ottenute dall'elaborazione SfM (Structure from Motion). In primo luogo è prevista l'impostazione di una scala uniforme di colori per tutte le riprese termiche da svolgersi all'interno di software di analisi dei termogrammi. Il passaggio successivo prevede le operazioni di allineamento degli scatti (RGB e termico) e di orientamento delle riprese nello spazio tridimensionale che utilizza un sistema di riferimento di coordinate locali (X-Y-Z).

L'attribuzione di coordinate reali ai target di posizionamento, nota l'effettiva distanza tra i punti misurati, consente di scalare e sovrapporre correttamente le nuvole di punti ottenute e attribuire a ciascuna coordinata spaziale informazioni relative alla banda del visibile e dell'infrarosso termico.

La fase di costruzione delle nuvole di punti può prevedere, a seconda del livello di dettaglio desiderato, anche le operazioni di costruzione della nuvola densa e della mesh solida ovvero di rappresentazioni uniformi della superficie analizzata ottenuta per interpolazione tra i punti calcolati.

Si precisa che per ovviare agli effetti di riflessione solare che disturberebbero le riprese termografiche, è opportuno eseguire il rilievo durante le prime ore del mattino; in questo momento della giornata sono anche minimizzate le ombre portate sui prospetti legate a schermature orizzontali (come ad esempio i balconi, molto presenti negli ambiti urbani).

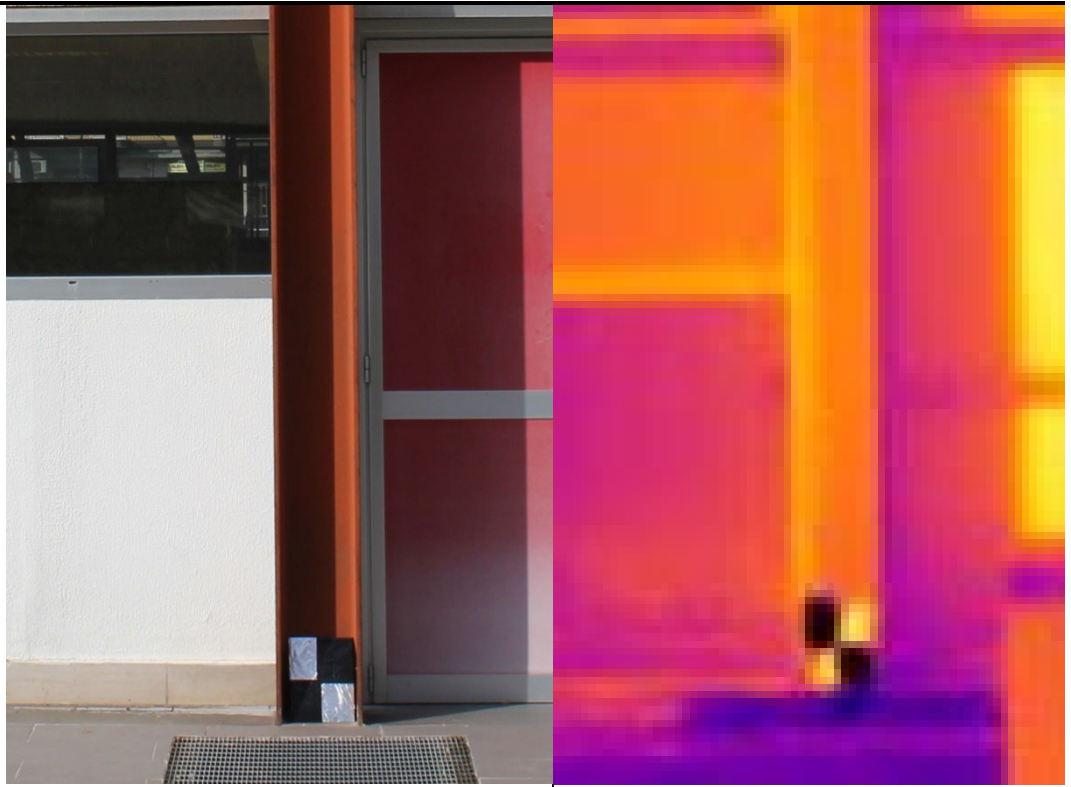


Figura 9 – rappresentazione del target di posizionamento impiegato all'interno degli scatti fotografici e termici

3.3.2.2 Analisi della nuvola di punti

La fase di analisi della doppia nuvola di punti consente di estrarre informazioni geometriche e di performance energetiche dell'oggetto indagato. Operativamente l'estrazione di informazioni geometriche richiede l'inserimento di marker di posizionamento con i quali interrogare il software StM ed ottenere informazioni sulle geometrie (distanze, angoli, superfici).

La lettura della temperatura superficiale dell'involucro avviene per confronto tra la scala di colori impostata ed il valore rilevato su specifici punti di analisi.

Nota la temperatura superficiale, la temperatura dell'aria all'interno e all'esterno della superficie indagata, la velocità del vento e l'emissività termica, si procede a mezzo della relazione proposta da Albatici (di seguito richiamata) proposta nel paragrafo 2.5 alla stima della trasmittanza termica dell'involucro opaco:

$$U = (5.7674 \epsilon_{\text{tot}} ((T_i/100)^4 - (T_{\text{amb}}/100)^4) + 3.8054v(T_i - T_{\text{amb}})) / (T_{\text{int}} - T_{\text{amb}})$$

ϵ_{tot} emissività sull'intero spettro (emissività integrale)

T_i – temperatura della superficie da indagare (K)

T_{amb} temperatura ambiente esterno (K)

v – velocità di convezione dell'aria

T_{int} – temperatura ambiente interno (K)

Ai fini della determinazione della trasmittanza termica di involucro si ritiene sufficiente utilizzare il valore medio di velocità e temperature dell'aria (interna ed esterna) in un intervallo temporale coincidente con la durata del rilievo.

La fase di analisi si completa con la categorizzazione manuale della nuvola di punti ovvero nell'attività che consente di individuare punti nello spazio 3D e associare un'id (etichetta) rappresentativa di una caratteristica omogenea (ad esempio tutte le superfici opache e tutte le superfici finestrate). L'operazione è da condursi all'interno di software dedicati alla gestione delle nuvole di punti che consentono la selezione di porzioni omogenee e l'attribuzione di caratteristiche sotto forma di valori alfa numerici.

In figura 10, a titolo di esempio, è riportato l'output grafico della fase in questione applicata ad un caso studio [116] in cui sono evidenziati in blu i punti rappresentativi delle superfici trasparenti, in giallo quelli relativi alle superfici finestrate dotate di schermature solari, in rosso quelli appartenenti alle superfici opache.

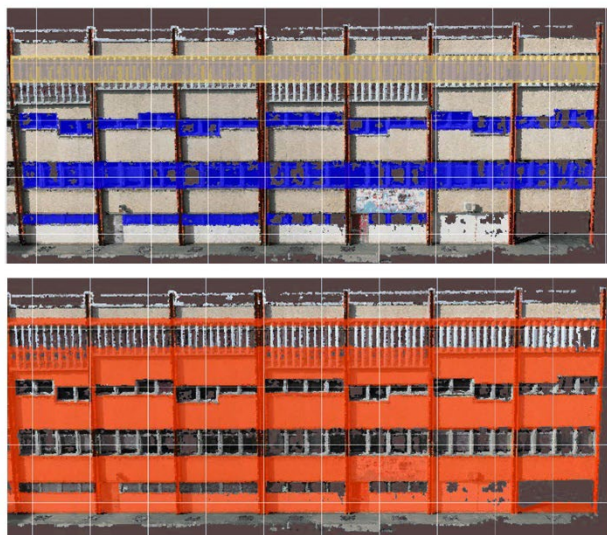


Figura 10 – Esempio di categorizzazione di una nuvola di punti (in blu le superfici finestrate, in giallo le superfici finestrate dotate di schermature solari, in rosso l'involucro opaco)

Per sintetizzare, la fase di analisi della doppia nuvola di punti consente rispetto alle geometrie di:

- misurare distanze;
- calcolare aree e volumi;
- isolare porzioni di involucro;
- ottenere un modello di supporto alla costruzione del modello 3D;

Rispetto alle informazioni termiche è possibile:

- utilizzare le relazioni proposte al paragrafo 2.5 per stimare la trasmittanza termica dell'involucro edilizio in maniera puntuale e di qui esportare l'informazione all'intero prospetto analizzato;
- individuare facilmente le superfici vetrate all'interno della nuvola di punti termica ricercando le regioni caratterizzate da un differenziale termico superiore a 10 °C [117] rispetto a quelle confinanti;
- individuare anomalie nell'isolamento termico;
- individuare regioni di maggiore trasferimento del calore;

- individuare zone riscaldate e non riscaldate.

Rispetto alle informazioni ottenibili dalla nuvola di punti categorizzata è possibile:

- individuare regioni omogenee in modo da facilitare la successiva fase di modellazione energetica;
- semplificare la rappresentazione della nuvola di punti a ciascuno dei quali è attribuita un'informazione tipologica.

Il principale vantaggio dell'approccio qui proposto consiste nella possibilità di ottenere con il rilievo una doppia nuvola di punti per l'area oggetto di interesse in modo da effettuare una caratterizzazione sia dal punto di vista geometrico (impiegando l'informazione RGB) che termofisico (impiegando l'informazione relativa all'infrarosso).

Un altro vantaggio consiste nel possibile uso dell'informazione termica per migliorare l'accuratezza del rilievo geometrico; gli scatti termici permettono di rilevare tutte le superfici vetrate o elementi non disperdenti quali logge e balconi, talvolta non individuabili a causa della presenza di schermature o elementi sovrapposti all'interno del rilievo RGB.

Uno svantaggio della metodologia di rilievo qui proposta sta nella necessità di ottenere nuvole di punti da rilievo fotogrammetrico che rappresenta una tecnica piuttosto laboriosa per la fase di analisi dei dati ma è considerata la tecnica più appropriata per la scala di interesse (il rilievo di un'area urbana); al contrario le più sofisticate tecniche LIDAR [118] o quelle tipiche del rilievo tradizionale risultano più indicate per applicazioni su singoli edifici.

Uno svantaggio della metodologia proposta, che prevede per il LOD4 il rilievo fotogrammetrico terrestre, riguarda la difficoltà di ottenere dati rappresentativi delle parti non visibili o solo parzialmente dalla sede stradale; in particolare le chiusure orizzontali di base e di copertura o le chiusure inclinate difficilmente sarebbero individuabili con la tecnica proposta per cui, a meno di fare ricorso al rilievo fotogrammetrico aereo, è prevista, a seconda del caso studio, l'integrazione con documentazione tecnica esistente o l'assunzione dell'ipotesi di coincidenza geometrica della sagoma esterna dell'edificio con le chiusure di base e di copertura.

La letteratura proposta in [119-124] mette in risalto che le tecniche avanzate per la caratterizzazione geometrica o termofisica consentono di ottenere informazioni parziali descrittive di singoli aspetti di interesse dell'oggetto edilizio indagato; la metodologia di rilievo proposta punta alla creazione in un'unica fase di un modello dotato sia di informazioni relative alla geometria edilizia e sia di informazioni relative alle performance energetiche.

3.3.2.3 Costruzione del modello in ambiente BIM

La fase in questione prevede una serie di passaggi che a partire dal modello realizzato come nuvola di punti, consente di giungere alla costruzione del modello BIM che sarà poi utile per la successiva fase di modellazione energetica. Va precisato che sia nella letteratura che nella pratica corrente, non risultano in essere metodi o strumenti che in maniera totalmente automatica consentono di convertire una nuvola di punti in un modello BIM; di solito si adottano dei procedimenti parziali che automatizzano parte del lavoro e possono essere implementati all'interno di plug-in dei software di modellazione BIM.

Nell'ambito della metodologia di cui al presente lavoro di dottorato si propone l'approccio consistente nei seguenti passaggi:

- **esportazione di porzioni omogenee di nuvole di punti:** a partire dalla nuvola di punti opportunamente georeferenziata ed etichettata è possibile esportare nei formati (.ply o .ASCII) porzioni omogenee caratterizzate dallo stesso id. Ad esempio, potrebbero essere esportate tutte le murature senza ulteriori elementi di dettaglio che in una prima fase della modellazione non sarebbero utili, per poi aggiungere le informazioni legate alle superfici finestrate o alle schermature;
- **importazione delle nuvole di punti categorizzate:** all'interno di software per la modellazione BIM è possibile importare singolarmente le nuvole di punti ottenute;

- **inserimento degli oggetti BIM:** a questo punto è possibile, servendosi della traccia fornita dalle singole nuvole di punti inserire gli oggetti BIM corrispondenti nella posizione realmente occupata;
- **caratterizzazione termofisica di involucro e delle zone riscaldate:** il modello BIM, a partire dalle informazioni ottenute dalla fase di analisi della nuvola di punti può essere arricchito con i dati sulla trasmittanza delle superfici verticali opache, sulla presenza di schermature, ecc.
- **esportazione del modello digitale:** ai fini di consentire la fase di modellazione energetica, il modello BIM è esportato nel formato “open standard gbXML - Green Building XML”.

In figura 11 è mostrato l’output del processo descritto in un’applicazione ad un caso studio di cui al riferimento [116].

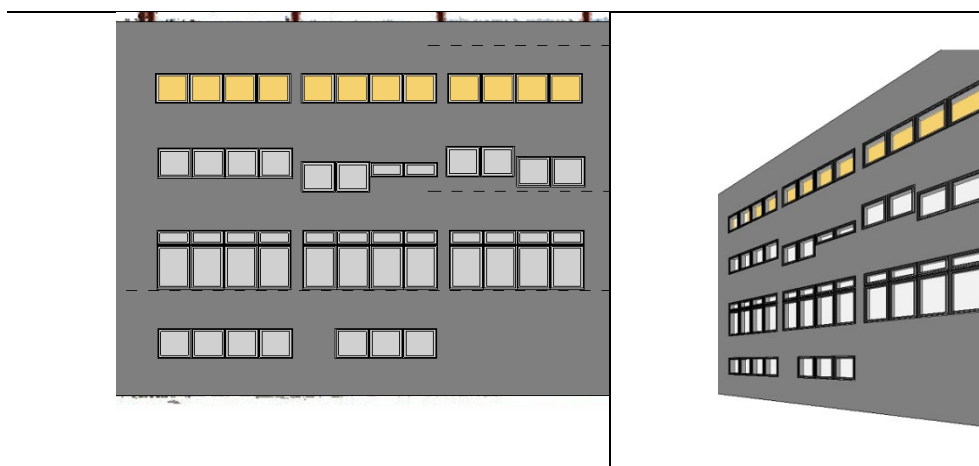


Figura 11 – Viste del modello BIM – esempio applicativo della modellazione di una facciata

3.3.3 LOD 1+ – Matrice di riferimento dati di input

La matrice di riferimento per il LOD1+ è uguale a quella relativa al LOD1 (paragrafo 3.3.1) con le seguenti precisazioni:

- i parametri altezza complessiva e superficie di piano sono determinati secondo una modalità mista che impiega sia i dati del sistema informativo territoriale (S.I.T.) e sia le informazioni acquisibili dal rilievo fotogrammetrico

con l'intento di migliorare l'accuratezza dimensionale degli edifici oggetto di indagine assicurando una maggior precisione dei risultati di output;

- il parametro trasmittanza chiusura verticale opaca è determinato secondo la modalità presentate al LOD4 ovvero mediante l'analisi delle riprese termografiche;
- il parametro rapporto tra superfici opache e trasparenti (WWR) è determinato secondo l'approccio del LOD4 ovvero mediante analisi delle riprese RGB e termiche eseguite per il rilievo fotogrammetrico.

3.3.3.1 Modello di calcolo LOD 1+

Il modello di calcolo adottato al LOD1 + è il medesimo del LOD1 ovvero il sistema 5R1C descritto dalla ISO 13790 implementato in City Energy Analyst.

3.4 Fase di validazione

La fase di validazione consiste nell'insieme delle procedure introdotte per testare l'affidabilità della metodologia in termini di accuratezza dei risultati ottenuti ovvero per confronto tra i dati di output rinvenuti dalla fase di modellazione energetica e quelli derivanti da misure o modelli più accurati.

Nella metodologia proposta, come meglio evidenziato nel paragrafo dedicato alla validazione applicata al caso di studio, è possibile procedere secondo la seguente modalità:

- validazione per confronto tra i dati di consumo di energia elettrica annua per abitante (kWh/ab*anno) rinvenuti dalla simulazione energetica e quelli calcolati a partire dai dati open (se disponibili) dell'area urbana indagata;
- validazione per confronto tra i dati di consumo di gas metano annuo per abitante (smc/ab*anno) provenienti dalla simulazione energetica e quelli calcolati a partire dai dati open (se disponibili) dell'area urbana indagata;
- validazione per confronto tra i dati di consumo di energia elettrica e gas metano rinvenuti dalla simulazione al LOD 1 e LOD 1+ con quelli risultanti dalla simulazione al LOD4 caratterizzata da maggior accuratezza nei risultati.

3.5 Individuazione degli utilizzatori finali della metodologia

La metodologia proposta è strutturata per essere divisa in diversi LODs a ciascuno dei quali corrisponde una diversa modalità di applicazione ovvero una maggiore o minore complessità della procedura. La modellazione al LOD1 è più semplificata sia per i dati richiesti e sia per la loro modalità di reperimento consentendo in generale una rapida applicazione. Viceversa, la modellazione al LOD4 risulta più raffinata sia per i dati richiesti come input e sia per il modello di calcolo impiegato ma richiede tempi di applicazione più lunghi in particolare per la fase di accesso documentale. La modellazione al LOD1+ risulta più vicina al LOD1 per semplicità applicativa ma richiede, come nel caso del LOD4, l'esecuzione di rilievo in situ.

La metodologia messa a punto è ideata per essere di supporto ai gestori del patrimonio immobiliare o, più in generale, a coloro interessati alla conoscenza delle caratteristiche costruttive e termofisiche degli edifici per varie finalità (progetto, ricerca, programmazione attività di manutenzione, indagini statistiche, ecc.).

I principali utilizzatori della procedura sono:

- gli enti locali;
- gli enti gestori di patrimonio immobiliare residenziale pubblico;
- le comunità energetiche;
- gli istituti bancari o assicurativi.

A seconda delle finalità richieste, è possibile diversificare l'applicazione della metodologia favorendo i LOD 1 e il LOD 1+ per indagini speditive caratterizzate da minore accuratezza dei risultati di output; il LOD 4 si adopererà per i casi in cui è richiesta maggior precisione dei risultati finali e quindi ad esempio per le attività di progettazione, monitoraggio e validazione.

3.6 Indicatori di stato e scenari di retrofit energetico

A questo punto il modello dell'area urbana realizzato ai diversi LODs si presta a successive elaborazioni finalizzate all'estrazione di indicatori di stato sintetici da

utilizzarsi per la fase di condivisione della conoscenza e più in generale di gestione di asset immobiliari.

La parte che segue propone una descrizione degli indicatori di stato e rappresenta un punto di partenza della metodologia messa a punto; il modello è cioè estensibile con qualsiasi informazione che possa risultare di interesse per gli obiettivi degli utilizzatori finali.

Seguono gli indicatori di stato (tab. 4) che sono stati individuati e saranno adottati nell'applicazione della metodologia esposta successivamente (capitolo 5).

Tabella 4 – Indicatori di stato per il modello GeoBIM

id.	STATO DI FATTO	Esempio
1	destinazione d'uso prevalente	<i>residenziale</i>
2	area del lotto (m2)	250
3	area di sedime edificio (m2)	150
4	rapporto di copertura (%)	60,00%
5	livelli fuori terra	4
6	livelli interrati	0
7	n.ro unità immobiliari presenti	8
8	tipologia edilizia	<i>in linea</i>
9	anno di costruzione	1962
10	eventuali ampliamenti	NO
11	effettuazione di interventi di retrofit energetico	NO
12	altezza tot. (m)	13,5
13	altezza di interpiano media (m)	2,8
14	numero di piani	4
15	volume totale (m3)	2025
16	vol. non risc. (incluso l'interrato)	0
17	tipologia schermature solari fisse	<i>aggetti/balconi</i>
18	tipologia schermature solari mobili	<i>tapparelle</i>
19	trasmissanza chiusura verticale opaca (W/m2*K)	0,91
20	trasmissanza chiusura orizzontale di base (W/m2*K)	1,10
21	trasmissanza chiusura orizzontale di copertura (W/m2*K)	1,15
22	trasmissanza chiusure trasparenti (telaio, vetro, P.T.) (W/m2 *K)	4,50
23	tipologia impianto termico gas (autonomo/centralizzato)	<i>autonomo</i>
24	tipologia sistema di generazione	<i>generatore a gas autonomo</i>
25	tipologia sistema di emissione	<i>radiatori</i>
26	presenza rete distribuzione energia elettrica	SI
27	presenza rete distribuzione gas metano	SI
28	consumi elettrici	<i>da OpenData</i>
29	consumi gas	<i>da OpenData</i>
30	numero di occupanti	16
31	densità di occupazione spazio (persona/m2)	0,027
32	proprietà prevalente	<i>Ente pubblico</i>
33	effettuazione di interventi di rigenerazione urbana	NO
34	specificità degli interventi di rigenerazione urbana se eseguiti	-
35	presenza di misure di mitigazione dell'isola di calore urbana (edificio)	NO
36	presenza di misure di mitigazione dell'isola di calore urbana (pertinenze)	NO
37	presenza di materiali ad alta riflessione solare in copertura o sulle pertinenze	NO
38	produzione elettrica da fotovoltaico (scenario comunità energetiche)	NO
39	Disponibilità d'uso degli spazi pubblici aperti nelle aree urbane	SI
40	Accessibilità del sistema di trasporto pubblico	SI
41	Presenza di sistemi per il trattamento e recupero delle acque meteoriche	NO
42	Presenza di sistemi per il trattamento e recupero delle acque grigie	NO
43	Presenza di aree verdi	SI
44	Presenza di aree verdi naturali	NO
45	Presenza di poste ciclabili dedicate	NO

Si può vedere come sono presenti varie tipologie di indicatori, da quelli più descrittivi e generali riferiti alle informazioni essenziali dell'edificio, ad altri che entrano nel merito della tecnologia di involucro e dell'impianto di climatizzazione, oltre che indicatori riferiti alla presenza di sistemi per il trattamento delle acque meteoriche, per il recupero di quelle grigie, la presenza di aree verdi naturali o alla presenza di piste ciclabili.

Nell'ipotesi di pianificazione di interventi per l'efficientamento energetico sono presentati altri indicatori sintetici (tab. 5) da utilizzarsi all'interno del modello digitale:

Tabella 5 – Ulteriori indicatori di stato per il modello GeoBIM

id.	PIANIFICAZIONE INTERVENTO
A	risparmio energetico (%)
B	superficie oggetto di intervento (m2)
C	Fattibilità tecnica
D	Fattibilità operativa
E	Fattibilità amministrativa
F	Vincoli storici
G	Vincoli architettonici
H	Necessità di pareri, nulla osta e atti di assenso
J	Costo intervento (€/mq)
K	Costo totale intervento (€)
L	Costo di sostituzione del bene(€)
M	FCI - Facility condition index (%)
N	Incremento di valore del bene (%)
O	Utilizzo di materiali dotati di certificazione C.A.M.
P	Accesso alla sistema di incentivazione fiscale
Q	Disponibilità di documentazione in formato elettronico

Si tratta di indicatori che afferiscono al risparmio energetico conseguente all'implementazione di una misura per il retrofit energetico, alla fattibilità tecnica operativa, ai costi dell'intervento, alla disponibilità di documentazione in formato elettronico riferita all'area urbana indagata.

3.7 Costruzione del modello digitale georeferenziato: applicazione del GeoBIM

La metodologia proposta vede come ultima fase la messa a disposizione del modello digitale all'interno di un sistema GIS integrando le informazioni del modello

BIM (presente al LOD4) insieme agli output ottenuti con la fase di modellazione energetica, oltre che ad altri dati utili per la descrizione dell'area urbana individuati nelle matrici dei dati di input per tutti i livelli LODs proposti.

La procedura di seguito descritta, sintetizzata in figura 12, consente l'inserimento degli indicatori di stato presentati al paragrafo 3.6 a loro volta provenienti sia da database statistici che rinvenienti dal modello BIM dell'area urbana, all'interno di una piattaforma open GeoBIM gestibile con un comune browser web e finalizzata alla visualizzazione dei dati georeferenziati.

Come descritto nella figura che segue, il punto di partenza sono i dati ottenuti dalla modellazione ai vari LODs degli UESM (LOD1, LOD1+ e LOD4) che intrecciati con i dati statistici puntualmente descritti ai vari livelli di sviluppo (ENEA, Istat, ecc.) e con gli output della modellazione energetica, costituiscono la base di conoscenza dell'area urbana.

In questa fase si procede con la costruzione di un database in formato .csv costituito da tante righe quanti gli edifici dell'area urbana indagata e tante colonne quanti gli indicatori di stato presentati al paragrafo 3.6. Questo semplice database si interfaccia con lo Shapefile dell'area urbana indagata in cui ogni edificio è rappresentato attraverso una sagoma costituita da una polilinea chiusa alla quale è associato un id numerico rappresentativo dell'edificio analizzato.

Segue la procedura di attribuzione dei dati georeferenziati che prevede l'uso di software per la gestione dati territoriali; nell'ambito dell'attività di ricerca è stato utilizzato l'applicativo QGIS che mediante le funzioni di import .csv e di join dei dati provenienti dal database costruito, consente la rappresentazione dell'area urbana con tutti gli indicatori di stato correttamente attribuiti ai vari poligoni rappresentativi degli edifici.

A questo punto mediante le funzioni di export dei risultati all'interno del Web Browser, è possibile esportare mappe tematiche interattive interrogabili dalle quale poter procedere alla lettura del database di partenza.

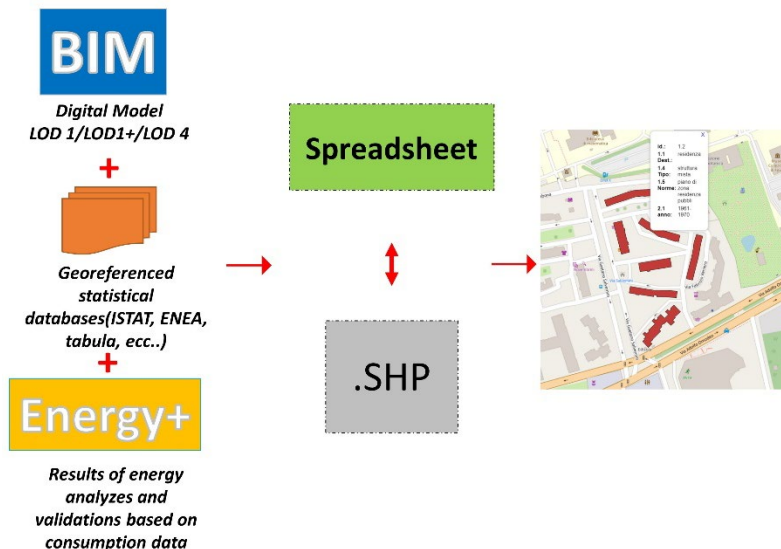


Figura 12 - Procedimento logico finalizzato alla costruzione del modello GeoBIM

L'output che si ottiene è dunque un modello digitale dell'esistente gestibile in ambiente GIS al quale sono associati con opportune tabelle di attributi i dati caratterizzanti il contesto urbano indagato.

La metodologia proposta relativa all'applicazione del GeoBIM consente di implementare delle funzioni base di reporting dei dati allo scopo cioè di consentirne la conservazione e anche l'interrogazione; la piattaforma web-gis attraverso una semplice selezione dell'edificio oggetto di interesse consente di visualizzare i dati richiesti. La funzionalità di analisi è implementata a livello di semplici operazioni matematiche all'interno del database in formato .csv il quale a seguito di un qualsiasi aggiornamento consente di implementare le modifiche nella piattaforma web-gis.

4. APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA DI RILIEVO – CASO STUDIO 1

La metodologia messa a punto ha visto durante l'attività di ricerca una applicazione parziale ad un caso studio [125] costituito da un edificio pluripiano sito nel campus universitario del Politecnico di Bari.

Durante questa parte del lavoro si è potuta condurre una applicazione della metodologia di rilievo finalizzata a testare la procedura per la sua accuratezza valutata mediante il confronto tra i dati ottenibili dal rilievo fotogrammetrico RGB e termico con quelli desumibili da indagini specifiche o documentali. Si sono perciò condotti studi per calcolare i valori numerici di trasmittanza termica puntuale e le misure di distanza tra target di posizionamento posti a prospetto sull'edificio oggetto di analisi; il primo dato è stato calcolato a partire dall'applicazione del metodo termografico e lo si è confrontato con quello riportato nella relazione energetica dell'immobile, il secondo è stato calcolato a partire dalla nuvola di punti ottenuta come output del rilievo e lo si è confrontato con le stesse misure ottenute mediante l'impiego di distanziometri laser. In questo modo è stato possibile procedere, sotto il profilo quantitativo a dei test di accuratezza della metodologia proposta per la fase di rilievo (applicata al LOD1+ e al LOD4). La procedura ha consentito, inoltre, di estrarre anche alcuni risultati qualitativi utilizzati per l'interpretazione della tecnologia di involucro presente.

L'immobile fa parte di un complesso edilizio per istruzione universitaria costruito nella seconda metà degli anni '60 del secolo scorso, oggetto di riqualificazione energetica nell'anno 2008, costituito da quattro livelli calpestabili a servizio di aule (solo zona piano terra) e di uffici. Il caso di studio selezionato appartiene allo stesso periodo costruttivo degli ambiti di applicazione specifici della metodologia e presenta inoltre un tipo di morfologia compatibile con quella ricorrente, ad esempio, nell'edilizia in linea tipicamente presente nei contesti in esame.

Benché la metodologia proposta nella ricerca sia riferita ad aree urbane a prevalenza residenziale, nell'ambito di questa applicazione si è potuto analizzare un edificio a destinazione diversa ovvero istruzione e uffici in quanto l'oggetto della

valutazione è stata la sola fase di rilievo fotogrammetrico RGB e termografico che per le sue caratteristiche specifiche è applicabile anche ad altre destinazioni d'uso. L'impiego della metodologia su aree urbane non residenziali non è oggetto della ricerca, l'applicazione del metodo di calcolo vedrebbe alcune criticità legate, tra l'altro, ad una non semplice standardizzazione dei profili di occupazione ed uso dello spazio oltre che alla caratterizzazione degli impianti tecnologici.

Da un punto di vista tecnologico, la chiusura verticale presenta le caratteristiche definite nella tabella 6 ed è costituita da:

- una fodera muraria in pannelli leggeri prefabbricati dotati di strato isolante termico (poliuretano espanso - 2,5 cm) con finitura in laminato;
- una camera d'aria interna non ventilata (6 cm);
- un pannello rigido in lana di vetro (7 cm);
- dei pannelli prefabbricati in calcestruzzo (15 cm) solidali alla struttura portante in acciaio.

Tabella 6 – Soluzione tecnologica chiusura verticale opaca edificio oggetto di indagine

Materiale	Spessore (mm)	λ (W/m*K)	R (m²/K*W)
laminato in acciaio	0,5	52	-
poliuretano espanso	25	0,024	1,037
Camera d'aria non ventilata	60	0,375	0,16
Pannello rigido in fibra di vetro	70	0,038	1,84
Pannello in calcestruzzo	150	1,58	0,095

Le chiusure verticali trasparenti sono costituite da serramenti in alluminio e vetro camera. Per i primi tre piani sono presenti tapparelle avvolgibili (chiusure oscuranti), solo a piano quarto sono impiegate schermature solari realizzate in pannelli verticali in alluminio.

L'impianto termico è costituito da generatore a pompa di calore e terminali costituiti da ventilconvettori.

In questa fase dell'attività di ricerca ci si è concentrati sul rilievo della facciata principale allo scopo di testare l'affidabilità del metodo rispetto alla tecnica di rilievo da adoperarsi ai LOD1+ e LOD4.

Il rilievo è stato eseguito percorrendo il camminamento scoperto posto al livello del primo piano, di fronte al prospetto da analizzare (figura n.13). La facciata oggetto di studio ha dimensioni di circa 36 m per 10 m di altezza. La distanza tra la traiettoria seguita per il rilievo e il prospetto è di 10 m, per cui gli effetti dovuti alla distorsione ottica degli scatti fotografici sono stati molto limitati.



Figura 13 – parete oggetto di ripresa (in giallo), traiettoria seguita per il rilievo fotogrammetrico in rosso (fonte: GoogleMaps)



Figura 14 – strumenti utilizzati per la fase di rilievo: termocamera (1), macchina fotografica reflex (2), anemometro (3), termometro (4).

Il rilievo è stato condotto in inverno durante i primi giorni del mese di marzo dell'anno 2022 alle ore 08.00 del mattino; la giornata è stata caratterizzata da temperature basse e piogge frequenti. L'impianto termico era in funzione durante

l'esecuzione del rilievo, massimizzando il salto termico tra interno ed esterno a beneficio delle riprese termografiche.

La strumentazione utilizzata per il rilievo (fig. 14) è la seguente:

- termocamera FLIR T430sc dotata di sensore microbolometrico all'ossido di vanadio (VoX) non raffreddato in grado di produrre immagini termiche con risoluzione 320 x 240 pixel e accuratezza di +/- 2 °C;
- fotocamera reflex Canon 550D dotata di sensore CMOS da 18,0 Megapixel;
- termometri a resistenza elettrica data logger per la misura della temperatura dell'aria all'esterno ed all'interno della superficie interessata (accuratezza della misurazione di 0,5 °C);
- anemometro a ventolina per la misura della velocità del vento con accuratezza pari al 5 % del valore misurato.

Il rilievo è stato eseguito secondo le seguenti modalità:

- ogni 2 metri muovendosi parallelamente al prospetto oggetto di studio ottenendo complessivamente 15 scatti;
- i data-logger per la misura della temperatura sono stati posizionati 30 minuti prima dell'avvio della campagna di rilievo in modo da consentire alla sonda dello strumento di entrare in equilibrio termico con l'ambiente circostante;
- la velocità del vento è stata misurata come valore medio delle misurazioni eseguite ogni minuto durante la campagna di rilievo, ponendo lo strumento con l'asse della ventola parallelo ai prospetti da indagare in modo da analizzare la componente del flusso d'aria tangente alla parete.

L'output grafico è mostrato in figure 15 e 16 ed è costituito dalle nuvole di punti ottenute dal rilievo nello spettro del visibile e dell'infrarosso termico.



Figura 15 – Mesh solida nuvola di punti RGB (1-3: target di posizionamento; A-B punti di indagine trasmittanza termica)

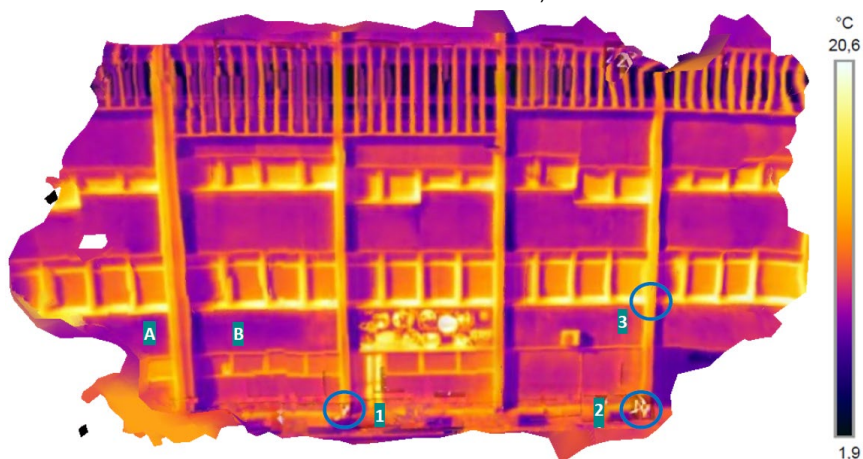


Figura 16 – Mesh Solida nuvola di punti rappresentazione della temperatura superficiale (1-3: target di posizionamento; A-B punti di indagine trasmittanza termica)

I risultati ottenuti dall'applicazione del metodo di rilievo sono:

- le superfici opache a piano primo, secondo e terzo hanno una distribuzione di temperatura compresa tra 7 e 8 °C in ragione di una soluzione tecnologica di involucro simile;
- le superfici opache a piano terra (che è costituita da pannelli leggeri non coibentati) presentano una temperatura superficiale più alta (10-12 °C) in

ragione di una maggiore dispersione di calore dall'interno all'esterno rispetto ai piani superiori;

- le superfici trasparenti risultano a temperatura compresa tra 14 e 15 °C e cioè mantengono un differenziale di temperatura rispetto alle chiusure opache pari a +4/+5 °C per quelle a piano terra e pari a +7/+8 °C per quelle ai piani superiori. Considerato che le chiusure verticali trasparenti installate su tutti i livelli dell'edificio sono le stesse, ne consegue che la differenza nelle temperature superficiali riscontrata è dovuta alla diversa tecnologia di involucro tra piano terra e i piani superiori;
- la temperatura superficiale dei pilastri in acciaio pari a 13-14 °C è dovuta al valore di emissività pari a 0,95 con cui è stata impostata la termocamera, valore non adeguato a rilevare correttamente la temperatura dei metalli che di solito presentano emissività pari a 0,69 [126];

Dal punto di vista quantitativo si sono ottenuti risultati relativi alla geometria e alla trasmittanza termica di involucro (tab. 7).

Per quanto attiene la geometria ci si è concentrati sul confronto tra i dati di distanza tra i target di posizionamento rilevati dalla nuvola di punti e quelli determinati con una tecnica di rilievo più accurata mediante distanziometri laser. Il confronto mostra uno scostamento contenuto nel 5 %.

Tabella 7 – Dati geometrici estraibili dal modello realizzato

	<i>Rilievo da nuvola di punti (m)</i>	<i>Rilievo in situ con distanziometro (m)</i>
<i>Distanza target 1 - 2</i>	11,93	12,60
<i>Distanza target 2 - 3</i>	4,04	4,30

Per quanto attiene alla trasmittanza termica di involucro, si è condotta un'analisi puntuale relativa alle porzioni di involucro mostrate in figure 15-16 e i risultati sono inseriti nelle tabelle 8 e 9:

Tabella 8 – Trasmittanza termica rilevata nel pt.A

$\epsilon\lambda$	emissività in banda 8-12 μ	0,95
ϵ_{tot}	emissività sull'intero spettro	0,55
Ti	temperatura superficie da indagare (K)	281,75
Tamb	temperatura dell'ambiente esterno (K)	280,95
v	velocità dell'aria (m/s)	0,50
Tint	temperatura dell'ambiente interno (K)	291,15
U	trasmittanza termica (W/mq*K)	0,37

Tabella 9 – Trasmittanza termica rilevata nel pt.B

$\epsilon\lambda$	emissività in banda 8-12 μ	0,95
ϵ_{tot}	emissività sull'intero spettro	0,55
Ti	temperatura superficie da indagare (K)	281,85
Tamb	temperatura dell'ambiente esterno (K)	280,95
v	velocità dell'aria (m/s)	0,50
Tint	temperatura dell'ambiente interno (K)	291,15
U	trasmittanza termica (W/mq*K)	0,42

Dal confronto tra la trasmittanza termica determinata mediante la norma UNI EN ISO 6946 [91] pari a 0,302 W/m²*K per le parti di involucro opaco e quella calcolata con il metodo termografico, risulta uno scostamento numerico pari a + 20% per il punto A e pari a + 30 % per il punto B.

I risultati ottenuti hanno consentito di estrarre i primi risultati qualitativi sulle potenzialità del metodo insieme a indicazioni circa il livello di accuratezza ottenibile dall'applicazione. L'attenzione è stata rivolta verso i parametri di stima della trasmittanza di involucro e su aspetti dimensionali in quanto considerati dati importanti (in termini di analisi di sensitività) sull'ottenimento di output il più possibile accurati.

Come risulta dalla letteratura già esposta [64] la modellazione al LOD 1 e LOD2 sono quelle utilizzate più comunemente per le aree urbane, questi tipi di approcci portano con sé errori nella resa geometrica che in pianta possono essere dell'ordine di 0,5-1 m e ancora di più in alzato visto che ad esempio al LOD1 le coperture inclinate vengono lette come piane nella rappresentazione dei volumi.

L'errore calcolato rispetto alle geometrie nel caso studio è inferiore a quello individuato nella letteratura.

Lo stesso ragionamento è applicabile per la misura della trasmittanza termica; infatti, come risulta dalla letteratura già esposta in [89] l'errore medio derivante dall'impiego del metodo termografico è dell'ordine del 20 %, in linea con quanto individuato con questa applicazione.

Il confronto tra i dati misurati nel caso di studio con quelli derivanti da altre tecniche di rilievo (per la misura della distanza) e da altre applicazioni su casi di studio (per la misura della trasmittanza), consentono di ritenere adeguata la tecnica di rilievo per gli obiettivi proposti di modellare aree urbane per finalità energetiche. Questa applicazione è stata di supporto per la successiva fase di validazione esposta nel capitolo 5 in cui si è proceduto con il confronto tra dati misurati relativi ai consumi di energia e quelli stimati con la modellazione per LODs.

5. CASO STUDIO 2 – APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA

5.1 Individuazione ambito urbano

L'area urbana oggetto di indagine per l'applicazione della metodologia proposta nei diversi LODs (1,1+ e 4) ricade in una porzione di un più ampio quartiere italiano sito a Bari denominato "San Pasquale" (fig.17-18) posizionato nel settore sud-est rispetto all'originario nucleo storico oltre la linea ferroviaria. Tale ambito è rappresentato nelle figure che seguono. Il caso studio è costituito da un'area urbana a prevalenza quasi esclusivamente residenziale costituita da n.7 blocchi edilizi del tipo in linea con differenti altezze e numero di unità immobiliari presenti. Gli edifici in questione furono costruiti tra il 1950 e il 1980 in forza di Leggi dello Stato a supporto dell'edilizia residenziale pubblica.

Dell'area in questione si sono raccolti i dati pubblici disponibili nel piano PIRP San Marcello disponibile sul sito web del comune di Bari, i dati disponibili dell'ultimo censimento ISTAT, le cartografie del S.I.T. della Regione Puglia.

L'analisi dell'area urbana in questione ha portato ad evidenziare la presenza di n.3 tipi di edifici ricadenti nella tipologia "in linea": il tipo 1 costituito da corpi di fabbrica a 4 piani fuori terra, ciascuno con n.2 unità immobiliari servite da un vano scala posto in maniera baricentrica per ogni modulo; il tipo 2 è invece costituito da moduli da 10 piani fuori terra ciascuno costituito da n.2 unità immobiliari servite da un vano scala centrale; infine il tipo 3 è costituito da moduli da 4 piani fuori terra in cui sono presenti n.2 unità immobiliari poste in maniera sfalsata rispetto al vano scala centrale (fig. 19).



Figura 17 – Al centro l'individuazione del caso studio coincidente con la sezione di censimento ISTAT (fonte cartografia: Google Earth)



Figura 18 – vista aerea del caso studio (fonte: Google Earth)

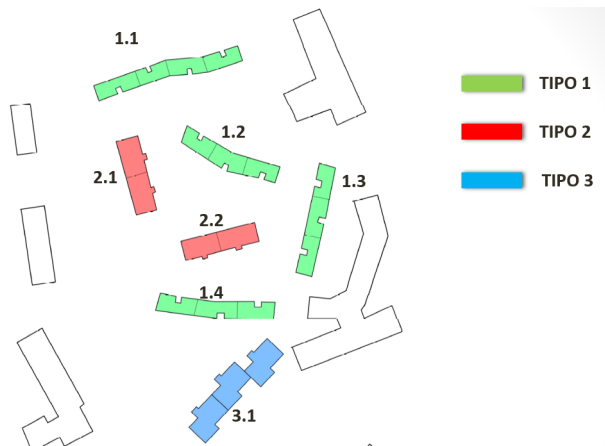


Figura 19 – indicazione dei tipi edilizi individuati nell'area oggetto di studio.

5.2 Modellazione al LOD1

La modellazione al LOD1 è avvenuta a partire dalla metodologia così come proposta nel capitolo 3. Significativa è la matrice di calcolo opportunamente valorizzata per la quale si rimanda all'allegato 1 per una dettagliata esposizione di tutti i dati di input richiesti; in questo paragrafo si sottolineano i seguenti aspetti:

- l'analisi dei dati ISTAT evidenzia: la destinazione d'uso prevalente residenziale, la tecnologia costruttiva mista (murature e telai in calcestruzzo armato), i periodi costruttivi (a partire dal 1946 fino al 1980);
- l'anno tipo di riferimento per le analisi energetiche è quello riferito alla stazione meteo Bari-Palese;
- l'altezza dei singoli edifici è stata desunta dalla carta tecnica regionale mentre la sagoma dal database Open Street Map;
- l'altezza di interpiano è stata ipotizzata a 3 metri;
- il tipo di schermature presenti è costituito da tapparelle avvolgibili;
- la tecnologia costruttiva per le chiusure verticali opache è del tipo monostrato in laterizio o tufo; per le chiusure orizzontali di base e di copertura del tipo solaio in latero-cemento non isolato; i serramenti con telaio in legno o metallo a singolo vetro;

- la capacità costruttiva complessiva rende assimilabili i tipi edilizi indagati al caso degli edifici a media inerzia termica;
- il tipo di impianto di riscaldamento prevede sistemi ad acqua con generatore a gas metano autonomo e terminali costituiti da radiatori;
- l'occupazione interna è stimata indirettamente a partire dalle superfici;
- la ventilazione è del tipo naturale attraverso le finestre assumendo come aria minima di rinnovo i valori riportati nella ASHRAE standard 62.1 [127] riferiti al residenziale.

5.3 Modellazione al LOD4

La modellazione al LOD4 è avvenuta a partire dalla metodologia così come proposta nel capitolo 3. Significativa è la matrice di calcolo opportunamente valorizzata per la quale si rimanda all'allegato 2 per una dettagliata esposizione di tutti i dati di input richiesti; in questo paragrafo si sottolineano i seguenti aspetti:

- l'analisi documentale e dei dati ISTAT evidenziano: la destinazione d'uso prevalente residenziale, la tecnologia costruttiva mista per i tipi 1 e 3, a telaio in calcestruzzo armato per il tipo 2; i periodi costruttivi (a partire dal 1946 fino al 1980);
- l'anno tipo di riferimento per le analisi energetiche è quello riferito alla stazione meteo Bari-Palese;
- l'altezza dei singoli edifici è stata desunta dall'analisi documentale;
- l'altezza di interpiano è stata desunta dall'analisi documentale insieme al numero di unità immobiliari;
- il tipo di schermature presenti è costituito da tapparelle avvolgibili;
- la tecnologia costruttiva è per le chiusure verticali opache del tipo monostrato in laterizio; la chiusura orizzontale di base e copertura del tipo solaio in latero-cemento non isolato; i serramenti con telaio in metallo a singolo vetro;
- la capacità termica complessiva è determinata a partire dal modello energetico costruito nel software di calcolo;

- il tipo di impianto di riscaldamento è costituito da sistemi ad acqua con generatore a gas metano autonomo e terminali costituiti da radiatori;
- l'occupazione interna è calcolata a partire dalla conoscenza dei dati ISTAT essendo la sezione di censimento coincidente con il caso studio;
- la ventilazione è del tipo naturale attraverso le finestre assumendo i valori riportati nella ASHRAE standard 62.1 [127] riferiti al residenziale.

5.3.1 Rilievo e costruzione della nuvola di punti

L'attività di rilievo per le finalità di costruzione del modello al LOD4 è stata eseguita mediante tecnica fotogrammetrica mista (RGB e infrarosso) mediante alcuni scatti fotografici acquisiti dalla sede stradale pubblica, oggetto di successive elaborazioni per la costruzione della nuvola di punti, i cui risultati di sintesi sono esposti in figura 20 mediante alcune viste. Il rilievo si è concentrato su tre edifici ciascuno rappresentativo di un tipo edilizio con possibilità di estensione dei risultati del rilievo agli altri edifici identici per tipologia.



Figura 20 – sintesi di alcune viste ottenuti dalla costruzione della nuvola di punti

5.3.2 Analisi nuvola di punti

La fase di analisi della nuvola di punti ha consentito sia l'estrazione di informazioni geometriche e sia l'ottenimento di informazioni tipologiche. Nelle figure che seguono è mostrata l'individuazione con la procedura descritta nel capitolo n.3 delle superfici involucranti opache e trasparenti i cui risultati di sintesi sono esposti in figura 21.

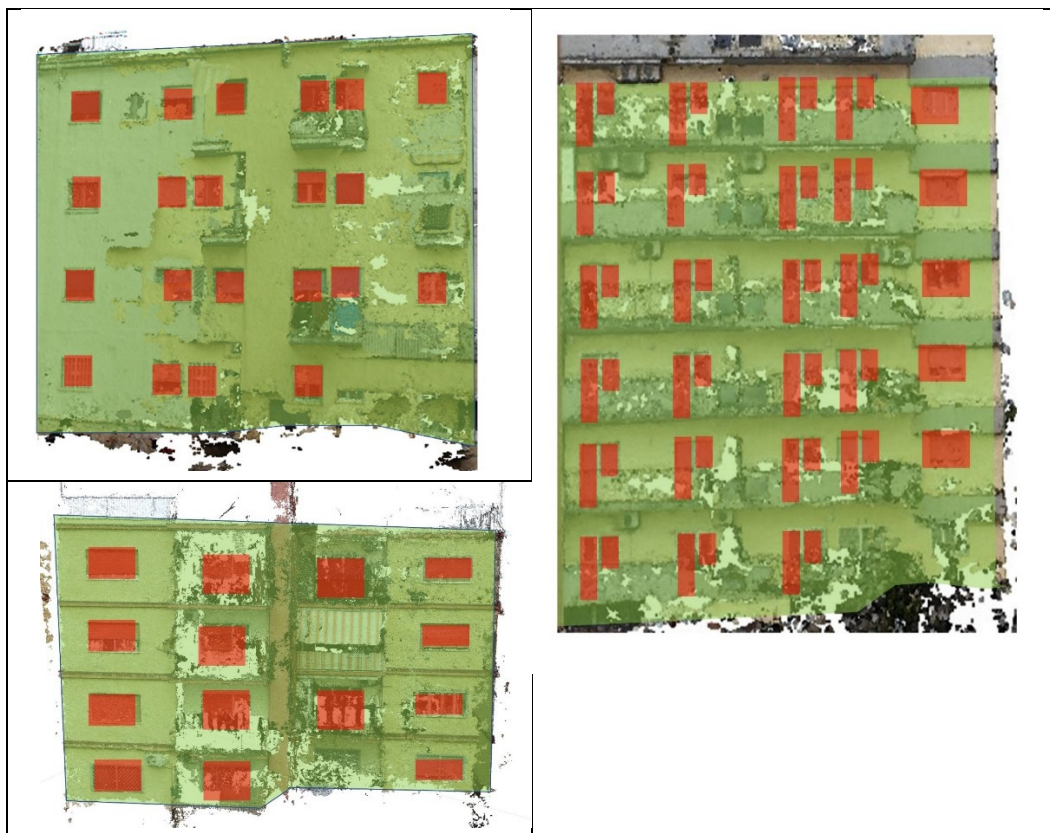


Figura 21 – sintesi dell'attività di riconoscimento di superfici involucranti opache e trasparenti applicata alla nuvola di punti.

Altri dati estraibili dalla nuvola di punti riguardano le informazioni geometriche: sagoma di base dell'edificio, altezza, dimensioni delle superfici finestrate.

Inoltre, l'applicazione degli algoritmi di cui al paragrafo 2.5 per la ricerca della trasmittanza termica di involucro ha consentito di determinare la trasmittanza termica media delle superfici opache verticali per ciascun edificio oggetto di rilievo. Per la lettura dei valori di trasmittanza ricercati si rimanda all'allegato 4 in cui è presente un

quadro sinottico per ciascuno dei prospetti analizzati suddiviso per tipo edilizio (1, 2 e 3) con l'indicazione della trasmittanza termica determinata nelle zone non interessate dalla presenza di ponti termici e di quella globale riferita all'intera superficie involucrante opaca verticale; si precisa che le condizioni di rilievo per la determinazione della trasmittanza termica di involucro sono le seguenti:

Tabella 10 – sintesi dati di input per la stima della trasmittanza termica

$\epsilon\lambda$	emissività in banda 8-12 μ	0,95
ϵ_{tot}	emissività sull'intero spettro	0,55
T_{amb}	temperatura dell'ambiente esterno (K)	284,15
v	velocità dell'aria (m/s)	0,40
T_{int}	temperatura dell'ambiente interno (K)	292,15

5.3.3 Costruzione del modello BIM

La costruzione del modello BIM utilizza la procedura descritta nel paragrafo 3.3.2.3 ed ha consentito di produrre per ciascuno dei tipi edilizi rilevati e oggetto di costruzione della nuvola di punti, il modello BIM così come esposte con delle viste sintetiche tridimensionali in figura 22.

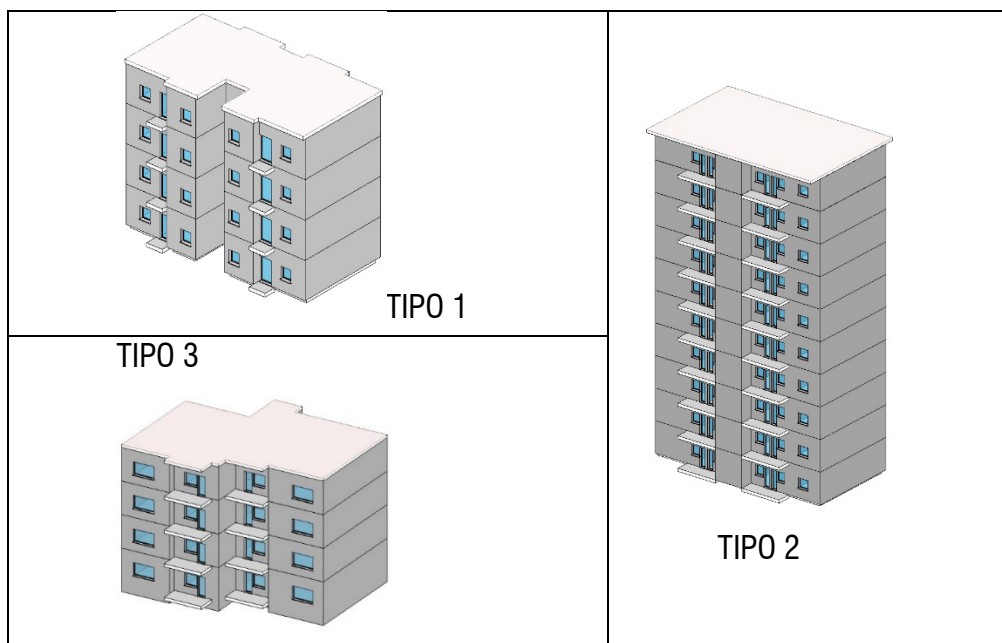


Figura 22 – viste 3D dei tipi edilizi analizzati

5.3.4 Criteri di modellazione energetica in regime dinamico implementata in Energy+: influenza degli aspetti distributivi e di orientamento.

Per il LOD 4, allo scopo di effettuare la modellazione energetica in regime dinamico implementata in Energy+ è stato necessario dividere l'area urbana in varie sottozone ma prima di ciò ci si è interessati sul migliorare la conoscenza della fisica del problema ovvero nella comprensione di alcuni aspetti relativi a:

- influenza della suddivisione in zone termiche delle singole unità immobiliari:** la modellazione a singola zona (coincidente con l'unità immobiliare) del profilo di occupazione ed uso dello spazio produce effetti in termini di sottostima (- 10 %) della *end use heating demand* rispetto alla modellazione multizona. Di seguito sono riepilogati i profili di uso adottati nella modellazione a singola zona o a doppia zona termica, derivanti dalla media di quelli relativi ai vari vani, ponderati in funzione della superficie degli stessi. Seguono, a titolo di esempio i profili adottati per la modellazione a singola zona ("SZ") e multizona ("MZ") ciascuna costituita da n.3 e n.2 vani (tab. 11).

Tabella 11 – Profili di uso dello spazio (SZ – modellazione a singola zona termica; MZ_2/3 vani – modellazione a doppia zona termica; WK - da lunedì a venerdì, WN - sabato e domenica)

	SZ		MZ_2 vani		MZ_3 vani	
	WK	WN	WK	WN	WK	WN
00:00	0,461	0,464	0,200	0,202	0,257	0,259
01:00	0,458	0,460	0,196	0,199	0,259	0,258
02:00	0,457	0,456	0,196	0,196	0,258	0,257
03:00	0,457	0,453	0,196	0,193	0,258	0,257
04:00	0,463	0,462	0,197	0,197	0,263	0,262
05:00	0,525	0,519	0,225	0,223	0,297	0,293
06:00	0,563	0,549	0,282	0,275	0,280	0,273
07:00	0,516	0,513	0,308	0,305	0,208	0,208
08:00	0,387	0,378	0,261	0,262	0,127	0,117
09:00	0,339	0,329	0,248	0,251	0,092	0,078
10:00	0,358	0,348	0,260	0,258	0,100	0,092
11:00	0,454	0,456	0,311	0,315	0,144	0,143
12:00	0,588	0,592	0,376	0,380	0,211	0,212
13:00	0,531	0,556	0,320	0,340	0,209	0,215
14:00	0,474	0,488	0,318	0,336	0,155	0,152
15:00	0,386	0,406	0,300	0,318	0,087	0,088
16:00	0,357	0,380	0,281	0,302	0,078	0,080
17:00	0,396	0,406	0,291	0,299	0,107	0,109
18:00	0,396	0,395	0,303	0,300	0,095	0,097
19:00	0,355	0,360	0,288	0,294	0,069	0,068
20:00	0,400	0,418	0,313	0,326	0,088	0,093
21:00	0,517	0,546	0,346	0,364	0,171	0,182
22:00	0,526	0,522	0,246	0,243	0,277	0,276
23:00	0,487	0,487	0,219	0,219	0,265	0,265

- influenza dell'orientamento rispetto alla suddivisione in zone termiche delle singole unità immobiliari:** si è valutato come l'orientamento incida sul fabbisogno energetico utile a seconda della suddivisione dello spazio a doppia zona termica o a singola zona termica, verificando come la variazione massima del dato di output considerato è sempre contenuta nel 12 % per il periodo invernale e nel 7 % per quello estivo indipendentemente dall'orientamento considerato (fig. 23). Si precisa che per quest'analisi si è considerato sia il caso di suddivisione in due zone termiche parallele al prospetto principale e sia il caso di due zone termiche trasversali rispetto alla facciata;

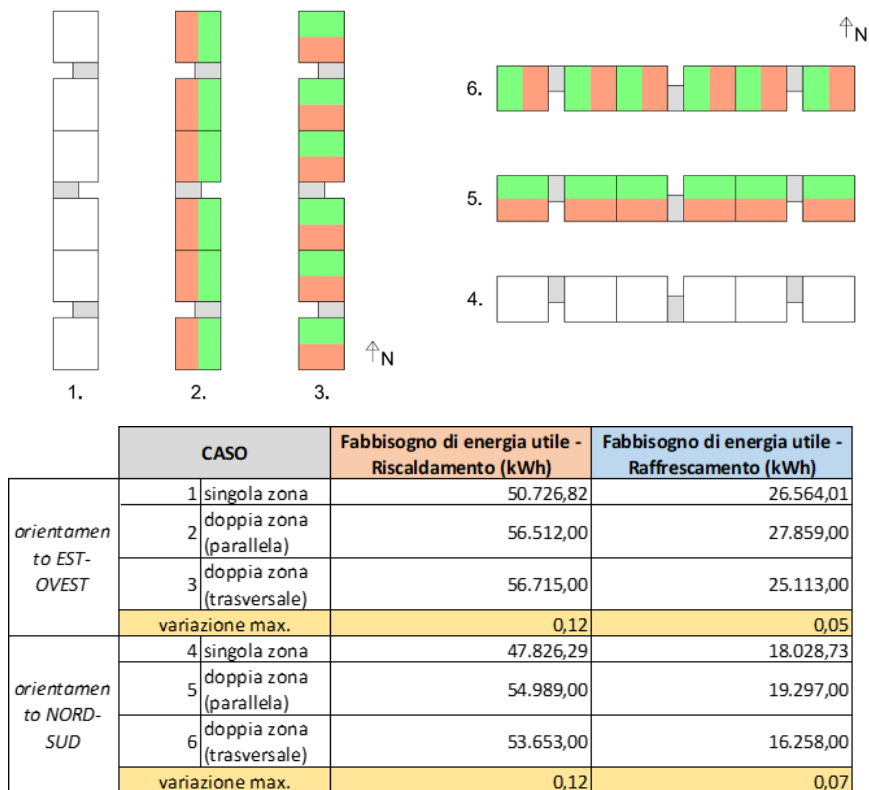


Figura 23 – influenza dell'orientamento e della suddivisione in zone termiche sul calcolo del fabbisogno di energia utile

- influenza della distribuzione interna:** si è valutato il confronto tra il caso di modellazione energetica a singola zona e il caso in cui l'unità immobiliare è modellata in tante zone quanti i vani esistenti, in particolare il confronto è stato condotto per n.3 appartamenti (fig. 24) collocati all'interno dell'edificio in linea in esame in posizioni periferiche o interne. Si è visto che la modellazione in più zone termiche porta a una sovrastima del fabbisogno di energia utile rispetto al caso monozona con un incremento che per la stagione di riscaldamento arriva fino al 9 % e per la stagione di raffrescamento arriva fino al 14 %.

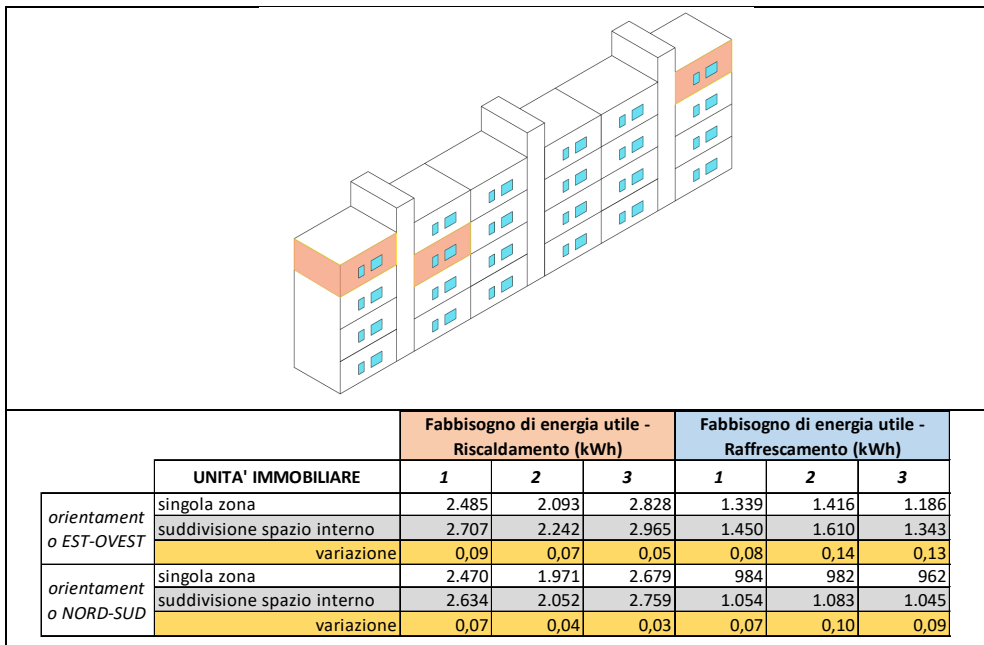


Figura 24 – Individuazione unità immobiliare (1 a sx, 2 al centro, 3 a dx)

Le analisi condotte hanno portato a stabilire che la modalità più appropriata per il caso studio in esame per effettuare la modellazione energetica consiste nel suddividere ciascuna unità immobiliare in almeno due zone termiche.

5.4 Modellazione al LOD1+

La modellazione al LOD1+ è identica a quella effettuata per il LOD1 con le sole differenze esposte nel capito 3 per si sono adoperati i dati del LOD4 in particolare per:

- le informazioni geometriche (altezza e superfici di piano);
- la trasmittanza termica delle involucro verticale opaco;
- il rapporto superfici finestrate su superfici opache.

5.5 Analisi dei risultati

Il dato di output preso a riferimento per le analisi in tutti i LODs in esame è la portata termica al generatore ottenuta dal rapporto tra fabbisogno di energia utile e rendimento globale medio stagionale dell'impianto riferito ai sottosistemi di regolazione, emissione, distribuzione e generazione.

Di seguito (tab. 12) i rendimenti adoperati, ciascuno calcolato attingendo ai valori tabellari della UNI-TS 11300.

Tabella 12 – specifica dei rendimenti adoperati per i servizi di riscaldamento e ACS

Riscaldamento	
Rendimento di generazione	0,73
Rendimento di distribuzione	0,95
Rendimento di emissione	0,95
Rendimento di regolazione	0,93
Rendimento globale medio stagionale	0,61

Acqua calda sanitaria	
Rendimento di generazione	0,73
Rendimento di distribuzione	0,89
Rendimento di erogazione	1
Rendimento globale medio stagionale	0,65

Relativamente ai tre livelli di dettaglio LOD1, LOD1+ e LOD4 e per ciascuno dei gruppi di edifici considerati è riportata la portata termica al generatore espressa in kWh unitamente all'indicazione del servizio di riferimento (riscaldamento e acqua calda sanitaria) e alla specifica della densità di potenza in kWh/m² ottenuta dal rapporto tra portata e superficie (tab. 13).

Tabella 13 – Output ottenuto ai LODs 1, 1+ e 4.

Portata termica al generatore (kWh)													
id.	SUP.NETTA complessiva	LOD 1				LOD 1+				LOD 4			
		m2	Heating	HW	TOT	kWh/m2	Heating	HW	TOT	kWh/m2	Heating	HW	TOT
1.1	1454,00	132.700,00	41.580,00	174.280,00	119,86	128.220,00	41.570,00	169.790,00	116,77	106.876,49	36.710,79	143.587,28	98,75
1.2	1090,00	98.750,00	31.500,00	130.250,00	119,50	95.440,00	31.490,00	126.930,00	116,45	79.943,56	29.838,39	109.781,95	100,72
1.3	1090,00	100.150,00	33.470,00	133.620,00	122,59	96.680,00	33.460,00	130.140,00	119,39	82.171,38	29.595,20	111.766,58	102,54
1.4	1090,00	103.550,00	38.270,00	141.820,00	130,11	99.980,00	38.250,00	138.230,00	126,82	78.388,17	29.425,89	107.814,06	98,91
2.1	1435,00	132.888,00	55.074,00	187.962,00	130,98	128.369,00	54.950,00	183.319,00	127,75	119.779,88	39.995,38	159.775,26	111,34
2.2	1435,00	131.037,00	55.644,00	186.681,00	130,09	126.817,00	54.978,00	181.795,00	126,69	115.877,53	39.339,70	155.217,22	108,17
3	1552,00	154.690,00	44.630,00	199.320,00	128,43	149.780,00	44.330,00	194.110,00	125,07	133.001,53	35.964,29	168.965,82	108,87

Si vede come la variazione del parametro di output al LOD4 rispetto al LOD1+ e al LOD1 si attesta tra un minimo di -13% e un massimo di - 24 % (tab. 14).

Tabella 14 – confronto della variazione massima nel dato di output

Edificio	LOD4 rispetto a LOD1+	LOD4 rispetto a LOD1
	%	%
1.1	-15,43%	-17,61%
1.2	-13,51%	-15,71%
1.3	-14,12%	-16,35%
1.4	-22,00%	-23,98%
2.1	-12,84%	-15,00%
2.2	-14,62%	-16,85%
3	-12,95%	-15,23%

In figura 25 è mostrato il diagramma della portata termica al generatore calcolato per tutti gli edifici in questione ai tre LODs; il diagramma mostra in maniera più chiara come i risultati al LOD 1+ siano più vicini a quelli del LOD1 rispetto a quelli del LOD 4.

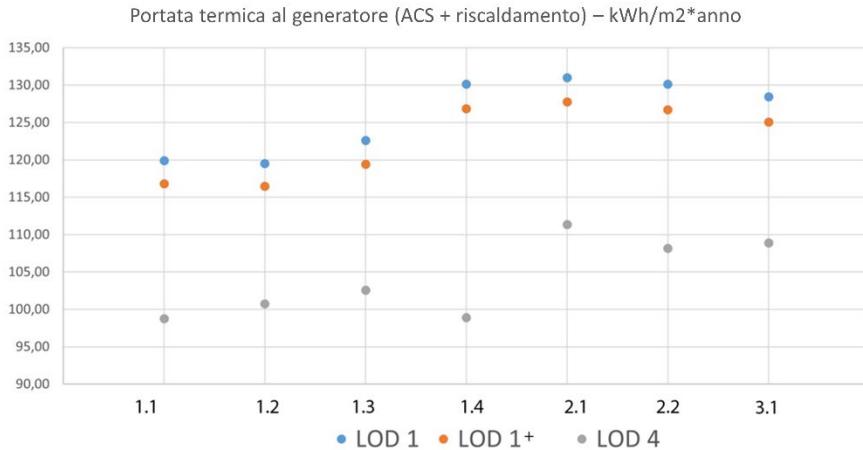


Figura 25 – diagramma rappresentativo dei risultati ottenuti

L'analisi condotta consente di valutare come, assumendo i risultati della modellazione al LOD 4 più accurati, i risultati al LOD 1 tendono a sovrastimare il consumo energetico degli edifici; discorso analogo per il LOD 1+. La motivazione principale consiste nel fatto che al LOD1 e 1+ la rappresentazione del costruito è semplificata e coincide con dei volumi chiusi che inglobano anche zone non riscaldata (ad esempio i vani scala).

5.6 Fase di validazione

La fase di validazione serve a confrontare i dati di consumo di energia elettrica e gas metano ottenuti dal lavoro di simulazione ai diversi LODs con i dati misurati disponibili nella piattaforma OpenData del comune di Bari.

La tabella n.15 che segue riporta i dati di consumo di energia elettrica per il quartiere San Pasquale a Bari unitamente all'indicazione della temperatura esterna media giornaliera.

Nella tabella n.16 è riportato il confronto tra il consumo giornaliero medio per abitante pro-capite simulato e calcolato a partire dai dati misurati pari a 1,186 kWh/ab*gg. Si vede come i risultati migliori si hanno per il LOD4 con uno scostamento massimo del 20 %.

Tabella 15 – indicazione dei consumi giornalieri di energia elettrica per abitante

data	giorno	popolazione (ab.)	consumo giornaliero (kWh)	consumo giornaliero pro capite (kWh/ab*gg)	Temperatura media giornaliera aria esterna (°C) - dati misurati
01/01/2015	giovedì	12735	17568,94	1,38	7,26
01/03/2015	domenica	12735	15992,45	1,26	10,81
01/04/2015	mercoledì	12735	14163,85	1,11	15,31
01/05/2015	venerdì	12735	13819,85	1,09	17,37
01/06/2015	lunedì	12735	13474,56	1,06	21,40
01/07/2015	mercoledì	12735	18542,98	1,46	23,96
01/08/2015	sabato	12735	15940,91	1,25	27,81
01/10/2015	giovedì	12735	14273,83	1,12	20,27
01/11/2015	domenica	12735	14833,62	1,16	16,82
01/12/2015	martedì	12735	16934,26	1,33	12,53
01/01/2016	venerdì	12735	17057,53	1,34	6,99
01/02/2016	lunedì	12735	14723,21	1,16	13,83
01/03/2016	martedì	12735	15331,32	1,20	12,08
01/04/2016	venerdì	12735	13582,76	1,07	16,95
01/05/2016	domenica	12735	13789,84	1,08	15,64
01/06/2016	mercoledì	12735	13463,69	1,06	21,27
01/09/2016	giovedì	12735	13197,94	1,04	24,32
01/12/2016	giovedì	12735	16866,33	1,32	9,84
01/03/2017	mercoledì	12735	14479,69	1,14	12,66
01/04/2017	sabato	12735	13287,61	1,04	17,40
01/06/2017	giovedì	12735	14733,96	1,16	23,20
01/07/2017	sabato	12735	16948,77	1,33	25,39
01/08/2017	martedì	12735	16527,61	1,30	28,04
01/11/2017	mercoledì	12735	14708,88	1,15	13,23
01/12/2017	venerdì	12735	17191,02	1,35	10,51
01/02/2018	giovedì	12735	14889,52	1,17	12,01
01/03/2018	giovedì	12735	15361,5	1,21	7,01
01/04/2018	domenica	12735	13341,85	1,05	12,96
01/05/2018	martedì	12735	13312,16	1,05	19,66
01/08/2018	mercoledì	12735	15630,88	1,23	27,83
01/10/2018	lunedì	12735	13609,73	1,07	19,75
01/11/2018	giovedì	12735	14099,85	1,11	18,09
01/12/2018	sabato	12735	16560,98	1,30	10,01

Tabella 16 – indicazione dei risultati del calcolo dell'energia elettrica confrontato con il valore medio misurato

id. EDIFICIO	End-use Electricity demand (kWh/anno)		
	LOD 1	LOD 1 +	LOD 4
1.1	32088	30676	24895
1.2	23928	22947	18687
1.3	23968	22626	18760
1.4	24800	23188	18687
2.1	62416	58983	51323
2.2	61784	57150	51323
3	35840	33510	34723
tot.	264.824	249.081	218.398
n.ro abitanti	421		
End-use Electricity demand procapite (kWh/giorno*ab)	1,72	1,62	1,42
End-use Electricity demand procapite (kWh/giorno*ab) - dati misurati	1,186		
deviazione (%)	45%	37%	20%

In figure 26-27 si è messo in evidenza il rapporto tra la temperatura media giornaliera dell'aria e il consumo di energia elettrica sia nel caso di calcolo dei consumi attraverso la simulazione (eseguita al LOD 4) e sia nel caso di fare riferimento ai dati misurati. Data la ridotta numerosità di dati misurati a disposizione, l'unico aspetto di interesse che accomuna le due curve è la tendenza dei consumi energetici a scendere con l'aumentare della temperatura dell'aria; in altri termini la stagione estiva e quelle intermedie hanno consumi più bassi di quella invernale. Il dato, può sembrare in controtendenza con gli scenari odierni che vedono un'ampia diffusione di impianti di climatizzazione dell'aria, ma bisogna considerare il fatto che nel quartiere in esame vi è elevata presenza di edilizia residenziale pubblica la quale tra i requisiti degli alloggi spesso non prevede il servizio di raffrescamento estivo.

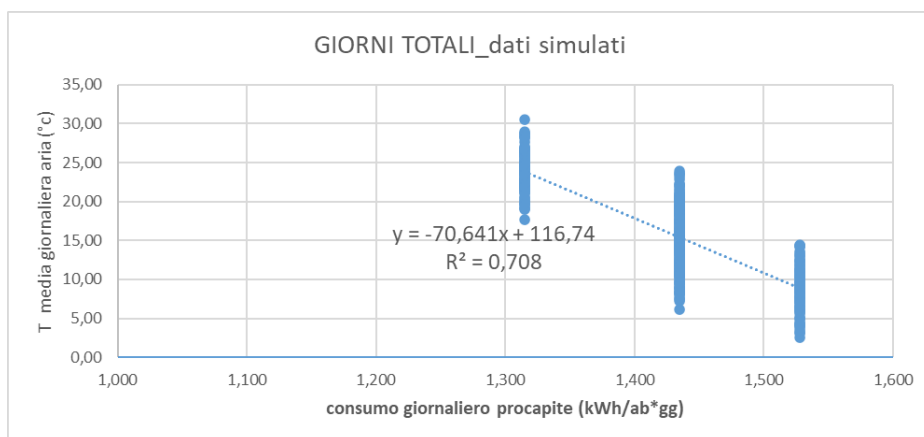


Figura 26 – diagramma rappresentativo del rapporto tra il consumo giornaliero pro-capite e la temperatura media giornaliera – DATI MISURATI

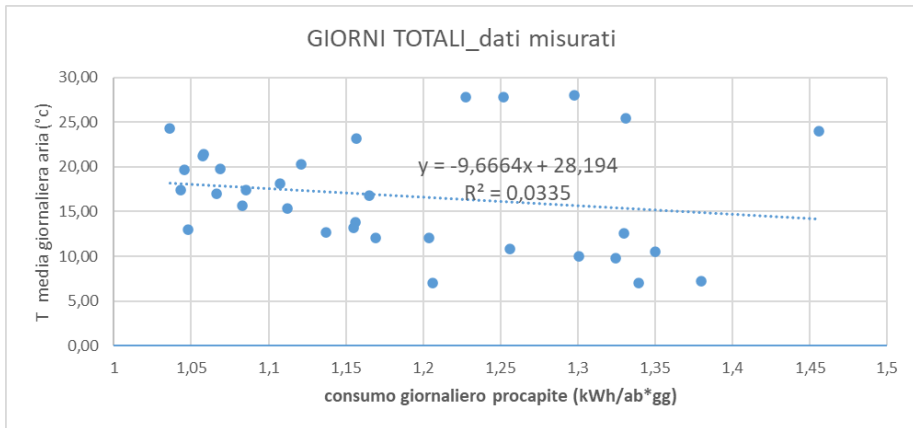


Figura 27 – diagramma rappresentativo del rapporto tra il consumo giornaliero pro-capite e la temperatura media giornaliera – DATI SIMULATI

La medesima procedura si è adottata per la validazione del metodo rispetto ai dati di consumo riferiti al gas metano, determinando il consumo giornaliero medio pro-capite per abitante in 0.726 smc/ab*gg.

Dal confronto tra il consumo medio giornaliero pro-capite di gas metano con la stessa tipologia di dato calcolato nelle simulazioni ai diversi LODs (1, 1+ e 4) esposto in tabella 17 emerge che lo scostamento massimo è stimato in +37% al LOD1 e +6% al LOD4.

Tabella 17 – indicazione dei risultati del calcolo del gas metano confrontato con il valore medio misurato

id. EDIFICIO	End-use Natural Gas demand (smc/anno)		
	LOD 1	LOD 1 +	LOD 4
1.1	13.836	12.798	11.519
1.2	10.341	9.607	8.628
1.3	10.765	9.850	8.761
1.4	10.922	10.212	8.491
2.1	44.224	41.570	33.175
2.2	43.772	40.795	32.841
3	18.864	17.638	14.968
tot.	152.724	142.471	118.384
n.ro abitanti	421		
End-use natural gas demand procapite (smc/giorno*ab)	0,99	0,93	0,77
End-use Electricity demand procapite (smc/giorno*ab) - dati misurati	0,726		
deviazione (%)	37%	28%	6%

La procedura di validazione descritta si completa con il confronto dei dati di consumo calcolati al LOD1 e LOD1+ con quelli del LOD4; quest'ultimo livello di sviluppo dell'UESM è utilizzato anche per la fase di validazione essendo in generale più accurato nei risultati prodotti. Quanto descritto risulta particolarmente utile nei contesti in cui non sono disponibili dati di consumo e nel caso in cui questi dati siano incompleti o parziali.

Nel caso studio risulta che per l'energia elettrica gli scostamenti rispetto al LOD4 calcolati al LOD1 e LOD1+ risultano rispettivamente del +21 % e +14 %; per il gas metano gli scostamenti rispetto al LOD4 calcolati al LOD1 e LOD1+ risultano rispettivamente del +28 % e +20 %.

Gli scostamenti descritti risultano in linea rispetto a quanto riportato nella letteratura [128] per cui i dati simulati su base annua relativi al bilancio energetico alla scala urbana sono affetti da errori rispetto a quelli misurati valutabili nella misura fino al 19 % se si guarda al dato aggregato complessivo di tutti gli edifici analizzati ma che può arrivare al 40 % se si considerano i singoli fabbricati; la metodologia, considerata la sua applicazione alla scala urbana, risulta perciò sufficientemente accurata.

5.7 Costruzione del modello digitale georeferenziato

Attraverso la metodologia descritta al paragrafo 3.7, richiamati gli indicatori di stato del paragrafo 3.6 è stato possibile costruire il modello digitale georeferenziato reso all'interno di un'interfaccia web-gis (fig. 28) con la quale è possibile:

- interrogare il database per conoscere i dati archiviati per ciascun edificio;
- evidenziare solo alcuni dati di interesse: per esempio è possibile filtrare gli edifici da visualizzare in funzione di valori limite della trasmittanza termica di involucro per definire strategie di retrofit energetico basate su priorità di intervento;
- essere di supporto alle amministrazioni per la gestione del patrimonio.

Questo risultato si è conseguito attraverso la procedura di costruzione del database di partenza attingendo ai dati disponibili per il LOD4 nel modello BIM, e per tutti i LODs nelle matrici dei dati di input per la modellazione energetica. In questa fase

la costruzione del database prevede una strutturazione in righe e colonne in cui alle prime corrispondono gli indicatori degli edifici presenti nell'area oggetto di studio mentre alle seconde tutti gli indicatori di stato.

A partire dalla carta tecnica regionale si sono importati tutti i vettori rappresentativi degli edifici analizzati a ciascuno dei quali è stato attribuito un identificativo numerico; seguono le fasi di importazione del database in .csv format nell'applicativo QGIS mediante le funzioni di "import" finalizzata al popolamento delle singole caselle attributi e "join" volta alla lettura dei dati già presenti nel database e ad evitare sovrascritture o duplicazione di dati.



Figura 28 – vista dello strumento web-gis sviluppato per il caso studio

Infine, attraverso l'esportazione del progetto QGIS mediante plug-in per la costruzione di mappe in ambiente web-browser è possibile realizzare la piattaforma web-gis interrogabile in cui, oltre alla funzione di visualizzazione dell'area urbana analizzata è possibile ottenere un report dei dati presenti nel database.

5.4 Potenzialità della metodologia: verso l'automazione della fase di raccolta dati – esempio applicativo nel caso della valutazione di soluzioni di retrofit energetico

La presente parte del lavoro di ricerca è incentrata sulla messa in evidenza di alcune potenzialità della metodologia attraverso l'applicazione pratica al caso di studio a partire dal modello al LOD 1+; in particolare gli aspetti analizzati sono:

- **possibilità di automazione della procedura:** nella figura che segue è messo in evidenza il processo logico finalizzato al popolamento semiautomatico della banca dati del software per l'analisi energetica al LOD1 e al LOD1+. La procedura prevede l'utilizzo congiunto da una parte del database relativo al sistema GeoBIM insieme a quello del software per l'analisi energetica relativo all'applicativo CEA; entrambi i database sono esportabili come fogli di calcolo ai quali è poi applicata una macro costruita con la finalità di trasferirne i dati dal sistema GeoBIM al software di calcolo energetico; a questo punto attraverso l'import del database è possibile condurre l'analisi energetica.

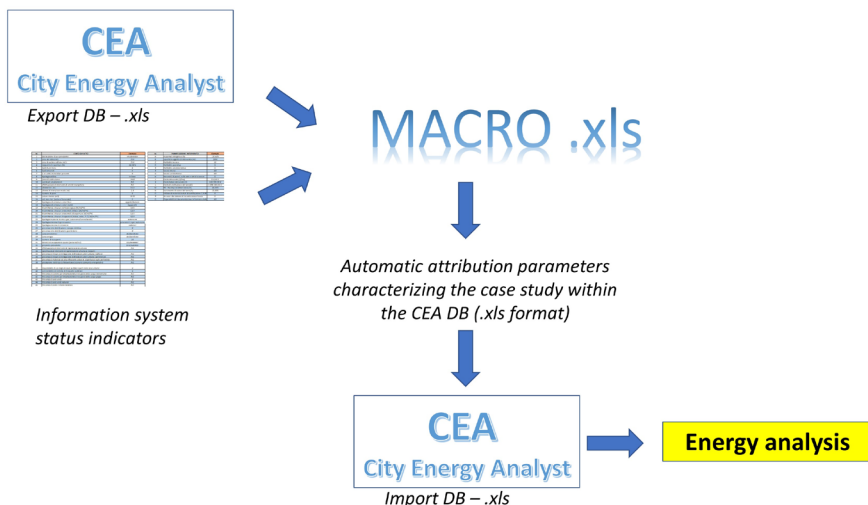


Figura 29 – descrizione della procedura per automatizzare l'inserimento dati nel database per le analisi energetiche

- **stima rapida dell'efficacia di misure di efficientamento energetico:**

un grande vantaggio della procedura consiste nella possibilità di verificare in tempi rapidi gli effetti dell'applicazione di misure di efficientamento energetico. Nel caso studio, ad esempio, si sono ipotizzati 4 scenari di soluzioni di retrofit energetico relative alla coibentazione della chiusura superiore (scenario EFF_1), della chiusura verticale opaca (scenario EFF_2), alla sostituzione degli infissi esterni (scenario EFF_3) e all'installazione di impianti solari fotovoltaici (scenario EFF_4). Per gli scenari EFF_1,2,3 si è calcolata la portata termica al generatore per le finalità di riscaldamento e si è confrontata la stessa con il caso baseline (scenario stato di fatto B_0). Il raffronto esposto in figura 30 consente, ad esempio, di stabilire che lo scenario EFF_2 di coibentazione della chiusura verticale opaca sia il più efficace nella riduzione dei consumi, segue lo scenario di sostituzione degli infissi quindi quello di coibentazione della copertura.

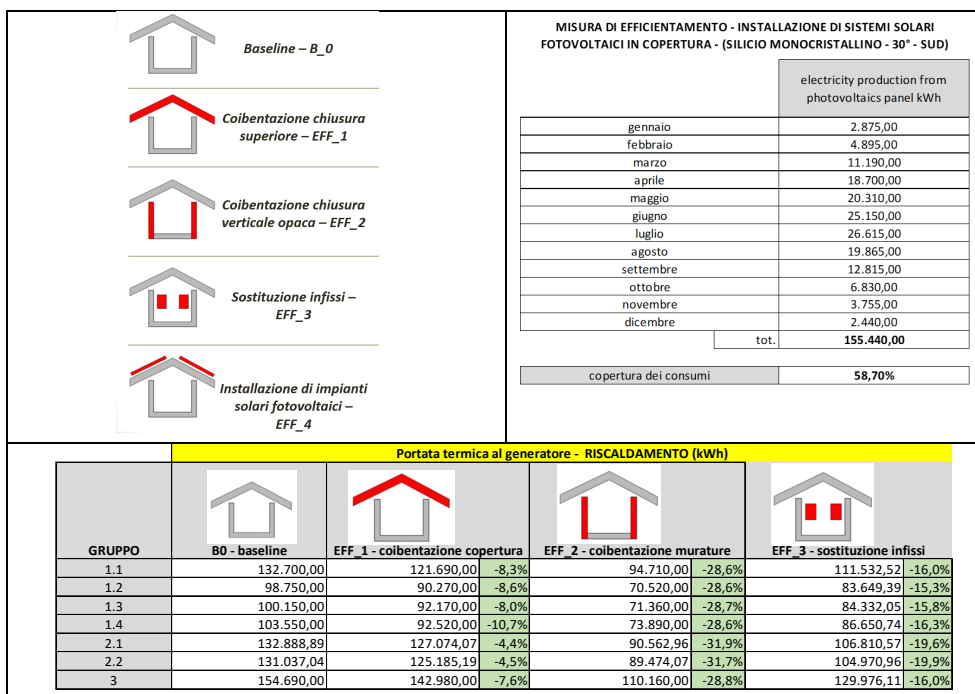


Figura 30 – risultati della simulazione energetica al LOD 1+ nella valutazione di scenari di retrofit energetico

- **stima rapida della capacità di produzione di energia elettrica relativa a sistemi solari fotovoltaici:** nel caso studio si analizza lo scenario di installazione su tutte le superfici piane disponibili di pannelli in silicio monocristallino standard orientati a sud con inclinazione 30° (scenario EFF_4). L'output (fig. 30) che si ottiene è la capacità di produzione di energia elettrica mensile e la copertura dei consumi elettrici stimata per il 58.70 % sui consumi totale calcolati. Quanto descritto potrebbe risultare utile negli scenari preliminari di valutazione circa l'efficacia dell'istituzione di comunità energetiche.

6.CONCLUSIONI

Il maggior contributo del lavoro nel panorama scientifico consiste nella proposta di una metodologia di analisi del tessuto edilizio esistente, che attraverso una articolazione in diversi livelli di sviluppo, è efficace sia nella stima dei consumi energetici quanto nell'analisi dei risparmi conseguenti all'introduzione di misure di efficientamento, in linea con l'evoluzione degli obiettivi sul tema della sostenibilità ambientale.

In termini generali, la metodologia proposta è inquadrabile nei metodi speditivi consentendo (soprattutto al LOD1 e in parte al LOD1+) ricognizioni rapide e con costi contenuti di aree urbane, con accuratezza adeguata alla definizione di politiche e strategie di intervento.

Uno dei punti di forza dell'approccio metodologico di rilievo consiste nella diversificazione nella tecnica applicata in funzione del livello di dettaglio atteso: al LOD1 (con un minor dispendio di risorse ma minore accuratezza) in grado di effettuare una ricognizione rapida essendo la fase di rilievo condotta mediante acquisizione dati a partire da database esistenti e non prevedendo cioè rilievi in situ o analisi documentali; al LOD 1+ e 4 (con un maggior quantitativo di risorse da mettere in campo ma maggiore accuratezza) eseguita con una tecnica fotogrammetrica a doppia camera di ripresa capace di caratterizzare gli ambiti urbani dal punto di vista geometrico e termofisico. Quest'ultima caratteristica consente, tra l'altro, di ottenere informazioni diffuse sugli involucri edilizi analizzati e non basate su stime o misure puntuali.

Un altro vantaggio della metodologia consiste nella capacità della tecnica fotogrammetrica a doppia camera (RGB e termografica) ad individuare correttamente le superfici vetrate anche quando queste potrebbero essere coperte da schermature durante il rilievo; in questi casi è infatti possibile sfruttare la termografia per individuare le zone a maggiore temperatura superficiale (rispetto alle parti opache) rappresentative della presenza di superfici vetrate.

Inoltre, il metodo di analisi del tessuto edilizio facilita la determinazione di regole per l'analisi semantica dei prospetti ed in generale per il riconoscimento di oggetti (superfici opache, superfici finestrate, schermature solari).

La metodologia di rilievo proposta aumenta la precisione e le informazioni deducibili dal rilievo geometrico e termico in quanto la doppia nuvola di punti consente di superare le criticità che dovessero sorgere durante la fase di rilievo (non adeguata sovrapposizione dei fotogrammi, condizioni al contorno non ottimali per il rilievo termico).

Un altro vantaggio della metodologia proposta sta nel modello di calcolo utilizzato ai LODs 1 e 1+ ovvero il sistema a 5R1C descritto dalla ISO 13790 cui corrisponde una ridotta quantità di dati di input e quindi implicitamente una maggior semplicità operativa.

Inoltre, la metodologia, incardinando nella scelta dell'UESM un approccio misto bottom-up e top-down garantisce, sicuramente per la ricognizione dei dati oggetto di rilievo, una maggiore precisione rispetto ad altre tecniche basate solo ed esclusivamente su analisi statistiche i cui dati di partenza non è detto siano rappresentativi dell'area urbana analizzata.

La metodologia proposta ha inoltre posto l'attenzione su questioni legate alla tecnologia di involucro, sul profilo di uso e occupazione degli spazi, sugli impianti e sulla eventuale integrazione delle fonti energetiche rinnovabili, aspetti trattati nella ricerca attraverso una ricognizione dei vari dati di input per i singoli LODs, descrivendo anche tecniche di acquisizione ed eventuali valori alfa numerici attribuibili; il risultato è stato lo sviluppo di una metodologia completa.

Un aspetto rilevante della proposta è la flessibilità della metodologia in ragione della possibilità di personalizzazione del modello digitale georeferenziato, che implementa la logica GeoBIM, a qualsiasi tipologia di dato garantendo una applicabilità oltre che per le finalità di modellazione energetica anche per gli studi di fattibilità, le analisi ambientali, sociali ed economiche. Questo risultato deriva proprio dall'impiego di strumenti personalizzabili per la creazione del database descrittivo

dell'ambito analizzato ma anche dalla possibilità di scambio di informazioni tra il modello BIM e il sistema GIS.

La metodologia produce come output dei risultati quantitativi accurati rispetto agli obiettivi del metodo (valutazioni energetiche alla scala di distretto urbano); l'approccio metodologico consente di superare le criticità legate ad un'eccessiva semplificazione nella rappresentazione delle aree urbane dovuta al ricorso a modalità di acquisizione dati non adeguate per i contesti in esame. Questo vantaggio è tanto più evidente se ci si riferisce ad ambiti in cui è presente una forte eterogeneità del costruito.

Si evidenzia, inoltre, come la ricerca possa essere di supporto agli avanzamenti tecnologici e ingegneristici che puntano sempre più alla creazione di modelli digitali di oggetti e entità tra cui le aree urbane allo scopo, a titolo di esempio, di ottenere in forma estesa e capillare disponibilità di open data, ampliamento della diffusione di tecnologie come la telelettura e lo smart metering, prototipazione e sviluppo di città intelligenti, guida autonoma, in generale infrastrutturazione digitale del territorio.

Un aspetto da non sottovalutare riguarda la disponibilità di dati e in particolare di quelli Open da adottare all'interno della piattaforma GeoBIM i quali se assenti rischiano di rendere scarsamente significativa la ricognizione di alcuni aspetti del costruito. A questo proposito, si evidenzia come nella parte di validazione della ricerca applicata al secondo caso studio, si siano confrontati i dati simulati nel modello energetico che utilizza come file temporale l'anno climatico tipo (situazione meteorologicamente più probabile) per la località climatica in esame, con i dati misurati che invece si riferiscono alle singole annualità di riferimento. Ne deriva come l'accesso agli open data abbia consentito di attribuire maggior peso alla parte di validazione che è basata su dati reali. La tecnologia dello smart metering risulterebbe di supporto alla metodologia proprio in relazione alla possibilità di fornire dati di consumo in tempo reale.

La metodologia proposta possiede il requisito della scalabilità rispetto alla possibilità di applicazione su aree di diversa estensione (purché a prevalenza

residenziale) in quanto è sufficiente applicare il LOD1 per rendere rilevabili aree anche molto vaste o viceversa fare riferimento al LOD4 per zone limitate a pochi edifici. Allo stato attuale il metodo non è scalabile se si considera l'applicazione in aree con diverse destinazioni d'uso ovvero non a prevalenza residenziale, tuttavia, almeno da un punto di vista teorico, superata la criticità di accesso ai dati, sarebbe possibile applicare la metodologia anche ad altre tipologie di aree urbane.

Un limite nell'applicazione del metodo relativo ai due casi di studio consiste nella selezione dell'area presa in esame per l'esecuzione del rilievo fotogrammetrico; è da considerare cioè il fatto che gli ambiti individuati hanno facilitato l'applicabilità della fase di acquisizione dei fotogrammi per le caratteristiche specifiche del contesto (strade ampie, linearità dei prospetti, ecc.) ma è possibile che la metodologia venga applicata in zone che presentano caratteristiche morfologiche tali da rendere difficile l'applicazione del rilievo fotogrammetrico (strade a ridottissima ampiezza, presenza di elementi architettonici molto aggettanti, variazioni altimetriche significative tra un edificio e quello adiacente), in questi casi è opportuno utilizzare congiuntamente anche l'analisi documentale o preferire l'applicazione al LOD1.

Uno degli sviluppi futuri della ricerca riguarda la possibilità di rilevare ambiti urbani interclusi in cui sono presenti coorti e in generale spazi interni. In questo caso si potrebbe ricorrere all'aerofotogrammetria che però non sempre è attuabile su aree densamente abitate per motivi autorizzativi.

Gli ulteriori sviluppi della ricerca potrebbero riguardare gli aspetti di messa a punto di strumenti che sfruttano l'intelligenza artificiale per la decodifica e l'analisi semantica dei prospetti, in questo modo sarebbero ottimizzate le procedure di costruzione del modello BIM a partire dal rilievo eseguito.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_it#:~:text=La%20CO2%20prodotta%20dalle,attivit%C3%A0%20umane%20in%20quantit%C3%A0%20inferiori.

[2] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/cities/>

[3] <https://www.pwc.com/sg/en/real-estate/assets/pwc-real-estate-2020-building-the-future.pdf>

[4] Zhang Deng, Kavan Javanroodi, Vahid M. Nik, Yixing Chen. Urban building energy modeling to quantify the energy performance of residential buildings under climate change. *Building Simulation* (2023) 16: 1629–1643.

[5] Borràs, I. M.; Neves D.; Gomes R. Using urban building energy modeling data to assess energy communities' potential. *Energy & Buildings* 282 (2023) 112791.

[6] Reuter, M.; Narula, K; Patel, M.K. Wolfgang Eichhammer. Linking energy efficiency indicators with policy evaluation – A combined top-down and bottom-up analysis of space heating consumption in residential buildings. *Energy & Buildings* 244 (2021) 110987.

[7] Moussaouia, F.; Cherraredb, M.; Kacimic, M. A.; Belarbid, R. A genetic algorithm to optimize consistency ratio in AHP method for energy performance assessment of residential buildings—Application of top-down and bottom-up approaches in Algerian case study. *Sustainable Cities and Society* 42 (2018) 622–636.

[8] Zirak, M.; Weiler, V.; Hein, M.; Eicker, U. Urban models enrichment for energy applications: Challenges in energy simulation using different data sources for building age information. *Energy* 190 (2020) 116292.

[9] https://www.enea.it/it/seguici/pubblicazioni/pdf-volumi/2020/guida_comunita-energetiche.pdf

[10] https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en

[11] Legge 28 febbraio 2020, n. 8 conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 30 dicembre 2019 n.162 recante “Disposizioni urgenti in materia di proroga di termini legislativi, di organizzazione delle pubbliche amministrazioni, nonché di innovazione tecnologica”

[12] EUROPE’S BUILDINGS UNDER THE MICROSCOPE; A country-by-country review of the energy performance of buildings (<https://www.bpie.eu/publication/europes-buildings-under-the-microscope/>)

[13] LEGGE 30 marzo 1976, n. 373. Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici

[14] Legge 9 gennaio 1991, n. 10. Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso nazionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia

[15] DECRETO LEGISLATIVO 3 marzo 2011, n. 28. Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili

[16] Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici

[17] Direttiva Europea EPBD IV - Energy Performance of Buildings Directive – (Direttiva Case Green) del 14 marzo 2023.

[18] https://www.cnr.it/sites/default/files/public/media/Summary%20for%20all_Italian.pdf

[19] <https://www.apepuglia.enea.it/certificatori.php>

[20] http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DICA_LCAB_AE#

[21] <https://www.oecd.org/social/social-housing-policy-brief-2020.pdf>

[22] Legge 18 aprile 1962, n. 167. Disposizioni per favorire l'acquisizione di aree fabbricabili per l'edilizia economica e popolare

[23] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview&action=stateexp-seat&lang=it#Consumo_finale_di_energia

[24] Gabrielli, L.; Ruggeri, A. G. Developing a model for energy retrofit in large building portfolios: Energy assessment, optimization and uncertainty. *Energy & Buildings* 202 (2019) 109356

[25] Aydinalp, M.; Ugursal, V.I.; Fung, A.S. Modeling of the appliance, lighting, and space-cooling energy consumptions in the residential sector using neural networks. *Appl. Energy* 2002, 71, 87–110.

[26] Barlow, S. *Guide to BREEAM*; RIBA Publishing: London, UK, 2011.

[27] Reuter, M.; Narula, K; Patel, M.K. Wolfgang Eichhammer. Linking energy efficiency indicators with policy evaluation – A combined top-down and bottom-up analysis of space heating consumption in residential buildings. *Energy & Buildings* 244 (2021) 110987.

[28] Moussaouia, F.; Cherraredb, M.; Kacimic, M. A.; Belarbid, R. A genetic algorithm to optimize consistency ratio in AHP method for energy performance assessment of residential buildings—Application of top-down and bottom-up approaches in Algerian case study. *Sustainable Cities and Society* 42 (2018) 622–636

[29] Zirak, M.; Weiler, V.; Hein, M.; Eicker, U. Urban models enrichment for energy applications: Challenges in energy simulation using different data sources for building age information. *Energy* 190 (2020) 116292.

[30] Mutani, G.; Todeschi, V. An Urban Energy Atlas and Engineering Model for Resilient Cities. *International Journal of Heat and Technology*. Vol. 37, No. 4, December, 2019, pp. 936-947.

- [31] Oldenberg O.; Murshed S.M.; Kremers E., Mainzer K.; Koch A. Model-based analysis of urban energy systems (On the basis of a city's energy master plan). *Emergence: Complexity and Organization* Volume 17, Issue 230 June 2015.
- [32] Broin, E.Ó.; Mata, É.; Göransson, A.; Johnsson, F. The effect of improved efficiency on energy savings in EU-27 buildings. *Energy* 2013, 57, 134–148.
- [33] Todeschi, V.; Boghetti, R.; Kämpf, J.H.; Mutani, G. Evaluation of Urban-Scale Building Energy-Use Models and Tools—Application for the City of Fribourg, Switzerland. *Sustainability* 2021, 13, 1595.A
- [34] Boghetti R.; Fantozzi F.; Kämpf J. Mutani G.; Salvadori G. Todeschi V. Building energy models with morphological urban-scale parameters: A case study in Turin. 4th IBPSA-Italy Conference on Building Simulation Applications, BSA 2019.
- [35] Yanxia Li; Chao Wang; Sijie Zhu; Junyan Yang; Shen Wei; Xinkai Zhang and Xing Shi. A Comparison of Various Bottom-Up Urban Energy Simulation Methods Using a Case Study in Hangzhou, China. *Energies* 2020.
- [36] Tu, J.V. Advantages and disadvantages of using artificial neural networks versus logistic regression for predicting medical outcomes. *J. Clin. Epidemiol.* 1996, 49, 1225–1231.
- [37] A. Favretto, *Strumenti per l'analisi geografica. GIS e telerilevamento*, Bologna, Pàtron 2006.
- [38] <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity>
- [39] <https://datatopics.worldbank.org/consumption>
- [40] <https://map.cad-fribourg.ch/carte-dynamique/>
- [41] <https://www.2030districts.org/toronto>

- [42] Sola, A.; Corchero, C.; Salom, J.; Sanmarti, M. Simulation Tools to Build Urban-Scale Energy Models: A Review. *Energies* 2018, 11, 3269.
- [43] Parshall, L.; Gurney, K.; Hammer, S.A.; Mendoza, D.; Zhou, Y.; Geethakumar, S. Modeling energy consumption and CO₂ emissions at the urban scale: Methodological challenges and insights from the United States. *Energy Policy* 2010, 38, 4765–4782.
- [44] Caputo, P.; Costa, G.; Ferrari, S. A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale. *Energy Policy* 2013, 261-270.
- [45] Biljecki, F.; Ledoux, H.; Stoter, J. An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems* 59(2016) 25-37.
- [46] <https://www.ogc.org/standard/citygml/>
- [47] <https://www.ogc.org/standard/gml/>
- [48] ISO 19136-1:2020. Geographic information Geography Markup Language (GML) Part 1: Fundamentals
- [49] Biljecki, F., Ledoux, H., Stoter, J., Zhao, J., 2014b. Formalisation of the level of detail in 3D city modelling. *Computers, Environment and Urban Systems* 48, 1–15.
- [50] He, S., Moreau, G., Martin, J.Y., 2013. Footprint-Based Generalization of 3D Building Groups at Medium Level of Detail for Multi-Scale Urban Visualization. *International Journal On Advances in Software* 5, 378–388.
- [51] Besuievsky, G., Barroso, S., Beckers, B., Patow, G., 2014. A Configurable LoD for Procedural Urban Models intended for Daylight Simulation, in: Besuievsky, G., Tourre, V. (Eds.), *Eurographics Workshop on Urban Data Modelling and Visualisation*, The Eurographics Association, Strasbourg, France. pp. 19–24

- [52] Wate, P., Srivastav, S.K., Saran, S., Murthy, Y.V.N.K., 2013. Formulation of hierarchical framework for 3D-GIS data acquisition techniques in context of Level-of-Detail (LoD), in: Proceedings of the 2013 IEEE Second international Conference on Image Information Processing (ICIIP-2013), Shimla, India. pp. 154–159.
- [53] Hagedorn, B., Trapp, M., Glander, T., Döllner, J., 2009. Towards an Indoor Level-of-Detail Model for Route Visualization, in: 10th International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware, IEEE, Taipei, Taiwan. pp. 692–697.
- [54] Boeters, R., Arroyo Ogori, K., Biljecki, F., Zlatanova, S., 2015. Automatically enhancing CityGML LOD2 models with a corresponding indoor geometry. *International Journal of Geographical Information Science* 29, 2248–2268.
- [55] Martina Ferrando, Francesco Causone, Tianzhen Hong, Yixing Chenc. Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches. *Sustainable Cities and Society* 62 (2020).
- [56] <https://www.epfl.ch/labs/leso/transfer/software/citysim/>
- [57] E. Walter, J.H. Kämpf, A verification of CitySim results using the BESTEST and monitored consumption values, 2nd IBPSA-Italy conference Bozen-Bolzano, 4th – 6th February 2015
- [58] <https://www.cityenergyanalyst.com/>
- [59] <https://www.nrel.gov/buildings/urbanopt.html>
- [60] Chao Wang, Martina Ferrando, Francesco Causone, Xing Jin, Xin Zhou , Xing Shi. Data acquisition for urban building energy modeling: A review. *Building and Environment* 217 (2022) 109056.
- [61] C. Campanella, Il rilievo degli edifici. Metodologie e tecniche per il progetto di intervento, Palermo, Dario Flaccovio Editore 2017.

- [62] T. Hong, Y. Chen, X. Luo, N. Luo, S.H. Lee, Ten questions on urban building energy modeling, *Build. Environ.* 168 (2020), 106508.
- [63] Y. Chen, T. Hong, X. Luo, B. Hooper, Development of city buildings dataset for urban building energy modeling, *Energy Build.* 183 (2019) 252–265.
- [64] R. Nouvel, M. Zirak, V. Coors, U. Eicker, The influence of data quality on urban heating demand modeling using 3D city models, *Comput. Environ. Urban Syst.* 6 (2017) 68–80.
- [65] <https://www.qgis.org/it/site/>
- [66] Chicago data portal. <https://data.cityofchicago.org/>.
- [67] <https://github.com/Microsoft/USBuildingFootprints>
- [68] M. Micieli, *Aerofotogrammetria con i droni Mappatura e modellazione 3D del territorio con tecniche aerofotogrammetriche da SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto)* Palermo, Dario Flaccovio Editore 2019.
- [69] Xiangyun Hu, Lizhi Ye, A FAST AND SIMPLE METHOD OF BUILDING DETECTION FROM LIDAR DATA BASED ON SCAN LINE ANALYSIS, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-3/W1, 2013.
- [70] Wang, C., Cho, Y., and Gai, M. (2013). “As-is 3D Thermal Modeling for Existing Buildings using a Hybrid LIDAR System.” a special issue of *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering* (invited from 2011 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering in Miami, FL). 27(6), pp.646-656.
- [71] Wonka, P., Wimmer, M., Sillion, F., and Ribarsky, W. 2003. Instant architecture. *ACM TOG (SIGGRAPH)* 22, 3, 669–677.
- [72] Müller, P., Wonka, P., Haegler, S., Ulmer, A., and Gool, L. V. 2006. Procedural modeling of buildings. *ACM TOG (SIGGRAPH)* 25, 3, 614–623.

- [73] Bekins, D. R., and Aliaga, D. G. 2005. Build-by-number: Rearranging the real world to visualize novel architectural spaces. In Proceedings of 16th IEEE Visualization, 143–150.
- [74] Aliaga, D. G., Rosen, P. A., and Bekins, D. R. 2007. Style grammars for interactive visualization of architecture. IEEE Trans. On Vis. and Comp. Graph. 13, 4, 786–797.
- [75] Andelo Martinovic´ and Luc Van Gool. Hierarchical Co-Segmentation of Building Facades. 2014 2nd International Conference on 3D Vision.
- [76] Jun Cao, Henning Metzmacher, James O'Donnell, Jerome Frisch, Vladimir Bazjanac, Leif Kobbelt, Christoph van Treeck. Facade geometry generation from low-resolution aerial photographs for building energy modeling. Building and Environment 2017; 601-624.
- [77] <https://webtool.building-typology.eu/#sd>
- [78] <https://www.istat.it/it/censimenti/popolazione-e-abitazioni>
- [79] UNI EN ISO 13790:2008. Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento
- [80] Jiasha Fu; Shan Hu; Xin He; Shunsuke Managi; DaYan. Identifying residential building occupancy profiles with demographic characteristics: using a national time use survey data. Energy and Buildings, Volume 277, 15 December 2022, 112560.
- [81] R. Arababadi , et al. , Determining the feasibility of statistical techniques to identify the most important input pa-rameters of building energy models, Procedia Eng. 118 (2015) 1258–1265.
- [82] Babak Raji, Early-Stage Design Considerations for the Energy-Efficiency of High-Rise Office Buildings. Sustainability 2017.

- [83] A. Mastrucci, et al., Global sensitivity analysis as a support for the generation of simplified building stock energy models, *Energy Build.* 149 (2017) 368–383
- [84] R. Nouvel, M. Zirak, V. Coors, U. Eicker, The influence of data quality on urban heating demand modeling using 3D city models, *Comput. Environ. Urban Syst.* 6 (2017) 68–80.
- [85] UNI/TR 11552:2014 - Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici - Parametri termofisici
- [86] F. Arpino, M. Dell'Isola, V. Fernicola, G. Ficco, L. Iacomini. Riferibilità metrologica nella misura di trasmittanza termica mediante termoflussimetri. 65° Congresso Nazionale ATI – Domus de Maria (CA), 13-17 Settembre 2010.
- [87] Madding, R. Finding R-values of stud frame constructed houses with IR thermography. In *Proceedings of the InfraMation*, Reno, NV, USA, 3–7 November 2008; 261–277.
- [88] Albatici, R.; Tonelli, A.M.; Chiogna, M. A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance. *Appl. Energy* 2015, 141, 218–228.
- [89] Fokaides, P.A.; Kalogirou, S.A. Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. *Appl. Energy* 2011, 88, 4358–4365.
- [90] Dall'O', G.; Sarto, L.; Panza, A. Infrared screening of residential buildings for energy audit purposes: Results of a field test. *Energies* 2013, 6, 3859–3878.
- [91] UNI EN ISO 6946:2018. Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo
- [92] <https://geofit-project.eu/2019/07/25/geobim-geographical-and-building-information-creating-integrated-environments/>

- [93] Noardo F, Ellul C, Harrie L, Overland I, Shariat M, Arroyo O.K, Stoter J. Opportunities and challenges for GeoBIM in Europe: developing a building permits use-case to raise awareness and examine technical interoperability challenges. *Journal of Spatial Science* (2019).
- [94] <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/solutions/bim/docs/autodesk-bring-together-bim-gis-ebook-v18-it.pdf>
- [95] Zhiliang Ma, Yuan Ren. Integrated Application of BIM and GIS: An Overview. *Creative Construction Conference 2017, CCC 2017, 19-22 June 2017, Primosten, Croatia*
- [96] S.H. Park, E. Kim, Middleware for translating urban GIS information for building a design society via general BIM tools, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 15.3(2016): 447-454.
- [97] D.M. Sergi, J. Li, Applications of GIS-enhanced networks of engineering information, *Applied Mechanics & Materials* 444-445(2013):1672- 1679.
- [98] Y.C. Deng, J. C. P. Cheng, C. Anumba, A framework for 3D traffic noise mapping using data from BIM and GIS integration, *Structure & Infrastructure Engineering* (2016):1-14.
- [99] Cannelli, G., Glück, K., & Santoboni, S. (1983). A mathematical model for evaluation and prediction of the mean energy level of traffic noise in Italian towns. *Acta Acustica United with Acustica*, 53, 31–36
- [100] E. Hjelseth, T. K. Thiis, Use of BIM and GIS to enable climatic adaptations of buildings, *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: ECPPM 2008* (2008): 409.
- [101] J. Irizarry, E. P. Karan, F. Jalaei, Integrating BIM and GIS to improve the visual monitoring of construction supply chain management, *Automation in Construction* 31.5(2013):241–254.
- [102] I. Bianco, M. Del Giudice, M. Zerbinatti, A database for the architectural heritage recovery between Italy and Switzerland, *ISPRS -International Archives*

of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W2(2013):103-108

[103] A. Alsaggaf, Benefits of integrating BIM and GIS in construction management and control, The CSCE International Construction Specialty .Conference, Vancouver, Canada, 2015.

[104] <https://www.smart-energy.com/policy-regulation/digital-twins-maturity-continuum-david-socha/>

[105] <https://www.arcgis.com/index.html>

[106] <https://www.autodesk.it/products/revit/architecture>

[107] Zhu J, Wang X, Chen M, Wu P, Kim M.J. Integration of BIM and GIS: IFC geometry transformation to shapefile using enhanced open-source approach. Automation in Construction 2019, 106.

[108] <https://engage.safe.com/webinars/bim-and-gis-integration/>

[109] Decreto ministeriale Sanità 5 luglio 1975.

[110] Istruzioni ministeriali 20 giugno 1896

[111] Legge 30 marzo 1976, n. 373. Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici.

[112] Legge 17 agosto 1942, n. 1150. Legge urbanistica

[113] LEGGE 6 agosto 1967, n. 765 Modifiche ed integrazioni alla legge urbanistica 17 agosto 1942, n. 1150.

[114] 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.

- [115] Chieppa R., Dell’Osso G.R., Iannone F., Verso una metodologia per la caratterizzazione termo-fisica del costruito all’interno degli Urban Energy Simulation Models: stato dell’arte e primi elementi di una proposta innovativa. Atti del convegno internazionale Memoria e Innovazione, Genova 7-10 Settembre 2022.
- [116] Chieppa R., Dell’Osso G.R., Iannone F., Metodologia per l’analisi energetica di contesti edilizi consolidati: dal rilievo alla costruzione del modello digitale. Atti del convegno internazionale. In transizione. Opportunità e sfide per l’ambiente costruito, Bari 14-17 Giugno 2023.
- [117] Wang, C., Cho, Y., and Gai, M. (2013). “As-is 3D Thermal Modeling for Existing Buildings using a Hybrid LIDAR System.” a special issue of ASCE Journal of Computing in Civil Engineering (invited from 2011 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering in Miami, FL). 27(6), pp.646-656.
- [118] <https://it.wikipedia.org/wiki/Lidar>
- [119] Wonka, P., Wimmer, M., Sillion, F., and Ribarsky, W. 2003. Instant architecture. ACM TOG (SIGGRAPH) 22, 3, 669–677.
- [120] Muller, P., Wonka, P., Haegler, S., Ulmer, A., and Gool, L. V. 2006. Procedural modeling of buildings. ACM TOG (SIGGRAPH) 25, 3, 614–623.
- [121] Bekins, D. R., and Aliaga, D. G. 2005. Build-by-number: Rearranging the real world to visualize novel architectural spaces. In Proceedings of 16th IEEE Visualization, 143–150.
- [122] Aliaga, D. G., Rosen, P. A., and Bekins, D. R. 2007. Style grammars for interactive visualization of architecture. IEEE Trans. On Vis. and Comp. Graph. 13, 4, 786–797.
- [123] Andelo Martinovic´ and Luc Van Gool. Hierarchical Co-Segmentation of Building Facades. 2014 2nd International Conference on 3D Vision.
- [124] Jun Cao, Henning Metzmacher, James O’Donnell, Jerome Frisch, Vladimir Bazjanac, Leif Kobbelt, Christoph van Treack. Facade geometry generation from

low-resolution aerial photographs for building energy modeling. *Building and Environment* 2017; 601-624.

[125] Chieppa R., Dell'Osso G.R., Iannone F., Verso un nuovo Urban Energy Simulation Model. Prime applicazioni ad un caso studio. Atti del convegno internazionale 2030 D.C. Proiezioni future per una progettazione sostenibile, Messina, 17-19 Novembre 2022.

[126]<http://www.tecnologica.altervista.org/php5/index.php?title=Emissivit%C3%A0>

[127] ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013. Ventilation for acceptable Indoor Air Quality

[128] Chao Wang, Martina Ferrando, Francesco Causone, Xing Jin, Xin Zhou , Xing Shi. Data acquisition for urban building energy modeling: A review. *Building and Environment* 217 (2022) 109056.

8. RINGRAZIAMENTI

La mia gratitudine va ai miei supervisori, il prof. Francesco Iannone e il prof. Guido Raffaele Dell'Osso, per avermi guidato nel mio percorso di ricerca durante il dottorato.

Sono grato al Politecnico di Bari, alla struttura organizzativa, agli amici e a quanti hanno creduto in me.

Ringrazio la mia famiglia, in particolare Nicola e Chiara, per avermi supportato nelle mie scelte e avermi incoraggiato durante il mio percorso di studi.

9. ALLEGATI

		LOD 1	LOD 1_CEA (ISO 13790 - 5R + 1C)	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3
1. aspetti generali	1.1 destinazione generale	destinazione generale da sezioni di censimento ISTAT	cfr. tab. 0	n.7 edifici residenziali plurifamiliari (cfr. scheda ISTAT - "E3- edifici ad uso residenziale")		
	1.2 n.ro unità immobiliari presenti	N.C.	N.C.	N.C.		
	1.3 località/area geografica	coordinate geografiche da S.I.T.	specificare LAT e LONG (°)	41° 6'25.36"N - 16°52'54.92"E (area geografica)		
	1.4 tipologia e tecnologia costruttiva	[2.1] ==> tipologia e tecnologia costruttiva rappresentativa dell'intero edificio	cfr. tab. 1	altro materiale		
	1.5 aspetti normativi	sistema vincolistico prescrittivo	sistema vincolistico prescrittivo (regolamento edilizio, NTA, leggi e delibere)	piano di zona relativo alla realizzazione di edifici residenziali pubblici		

		LOD 1	LOD 1_CEA (ISO 13790 - 5R + 1C)	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3
2. aspetti temporali	2.1 periodo/anno di costruzione	anno di costruzione da sezioni di censimento ISTAT	cfr. tab. 2.	1 edificio tra 1946-1960 (TIPO 3)	4 edifici 1961-1970 (TIPO 1)	2 edifici 1971-1980 (TIPO 2)
	2.2 incremento volume	N.C.				
	2.3 retrofit energetico/ ristrutturazioni					
3. dati meteorologici (valutazioni standard)	3.1 T, UR, v, I. ecc	anno tipo (.epw format) stazione meteo di riferimento (città)	anno tipo (.epw format) - disponibile dal portale Energy+	stazione meteo Bari-Palese		
4. dati meteorologici (diagnosi energetica)	4.1 T, UR, v, I. ecc	N.C.				
5. dati meteorologici (termografie)	5.1 T, v					

ALLEGATO 1.2 – Matrice dati di input – LOD 1: Metodologia + caso studio

	LOD 1	LOD 1_CEA (ISO 13790 - 5R + 1C)	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3	
6. dati geometrici:	6.1 altezza complessiva	rappresentazione da S.I.T. / dati satellitari (Open Street Map)	definita dall'utente	desunta a partire dalla CTR del S.I.T. Regione Puglia		
	6.2 superficie di piano	si considera la superficie lorda coincidente con il perimetro esterno della sagoma dell'edificio				
	6.3 chiusura verticale esterna	rappresentazione da S.I.T. / dati satellitari (Open Street Map)	rappresentazione da Open Street Map	rappresentazione da OSM		
	6.4 profondità corpo di fabbrica					
	6.5 chiusura di copertura					
	6.6 chiusura orizzontale di base					
	6.7 superfici involucranti non riscaldate	N.C.				
	6.8 altezza di interpiano media	H int. Medio definito dall'utente (ipotesi 2.8-3 m)	H int. Medio definito dall'utente	si è considerata altezza di interpiano pari a 3 m		
	6.9 numero di piani	H tot [6.1]/h interpiano [6.8]				
	6.10 suddivisione spazio interno	N.C.				
	6.11 schermature solari fisse	N.C.	tipologia, rf_sh : Shading coefficient when shading device is active. (cfr. TAB 3)	rf_sh = 0.08 (tapparelle)		
	6.12 volume non riscaldato (incluso l'interrato)	N.C.				

ALLEGATO 1.3 – Matrice dati di input – LOD 1: Metodologia + caso studio

		LOD 1	LOD 1_CEA (ISO 13790 - 5R + 1C)	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3
7. modello energetico subsistema edilizio	7.1 zone termiche (riscaldare)	singola zona	singola zona			
	7.2 chiusura verticale opaca	definizione semplificata della chiusura di involucro	1.3 ; 1.4 ; 2.1 ==> tecnologia costruttiva componente edile [secondo UNI/TR 11552 o TABULA] (cfr. TAB. 4)	muratura in mattoni pieni 38 cm - soluzione monostrato in laterizio/tufo		
			1.3 ; 1.4 ; 2.1 ==> U _{wall} - Thermal transmittance of wall including linear losses (+10%) [secondo UNI/TR 11552 o TABULA [1.3, 2.1, 1.4] (cfr. TAB. 4)	U _{wall} = 1.48 W/m2K;	U _{wall} = 1.15 W/m2K;	U _{wall} = 0.80 W/m2K;
			a _{wall} : Solar absorption coefficient (cfr. TAB. 5)	white paint over plaster over clay brick- old building > a _{wall} = 0,3;		
			e _{wall} : Emissivity of external surface (cfr. TAB. 5)	e _{wall} = 0,84;		
			r _{wall} : Reflectance in the Red spectrum (cfr. TAB. 5)	r _{wall} =0,7		
	7.3 chiusura orizzontale di base	definizione semplificata della chiusura di involucro	1.3 ; 1.4 ; 2.1 ==> tipologia di chiusura [secondo UNI/TR 11552 o TABULA] (cfr. TAB. 4)	Solaio latero-cementizio		
			1.3 ; 1.4 ; 2.1 ==> U _{base} : Thermal transmittance of floor including linear losses (+10%). [secondo UNI/TR 11552 o TABULA] (cfr. TAB. 4)	U _{base} = 0.94 W/m2K	U _{base} = 0.94 W/m2K	U _{base} = 0.98 W/m2K
	7.4 chiusura orizzontale di copertura	definizione semplificata della chiusura di involucro	1.3 ; 1.4 ; 2.1 ==> tipologia di chiusura [secondo UNI/TR 11552 o TABULA] (cfr. TAB. 4)	Solaio latero-cementizio		Solaio latero-cementizio - basso livello di isolamento termico
			1.3 ; 1.4 ; 2.1 ==> U _{roof} : Thermal transmittance of roof including linear losses (+10%) (cfr. TAB. 4)	U _{roof} = 1.10 W/m2K;	U _{roof} = 1.10 W/m2K;	U _{roof} = 0.75 W/m2K;
a _{roof} : Solar absorption coefficient (cfr. TAB. 6)			piastrelle di argilla - vecchia costruzione > a _{roof} =0.55;			
e _{roof} : Emissivity of external surface (cfr. TAB. 6)			e _{roof} = 0.91			
r _{roof} : Reflectance in the Red spectrum (cfr. TAB. 6)			r _{roof} =0.44			

ALLEGATO 1.4 – Matrice dati di input – LOD 1: Metodologia + caso studio

		LOD 1	LOD 1_CEA (ISO 13790 - 5R + 1C)	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3
7. modello energetico subsistema edilizio	7.5 chiusure trasparenti (telaio, vetro, P.T.)	definizione semplificata della chiusura di involucro	1.3 ; 1.4 ; 2.1 ==> tipologia di serramento (cfr. TAB. 4)	Vetro singolo, telaio in legno		Vetro-camera con intercapedine
			1.3 ; 1.4 ; 2.1 ==> 'U_win : Thermal transmittance of windows including linear losses (+10%) (cfr. TAB. 4)	Uwin = 4.90 W/m2K;	Uwin = 4.90 W/m2K;	Uwin = 3.70 W/m2K;
			G_win : Solar heat gain coefficient (cfr. TAB. 7)	G_win = 0.85;		
			e_win : Emissivity of external surface (cfr. TAB. 7)	e_win=0.89;		
			F_F : Window frame fraction coefficient (cfr. TAB. 7)	F_F=0.2;		
			WWR N /S/E/O	WWR 0,2		
	7.6 stratigrafia partizioni	N.C.	N.C.	N.C.		
	CAPACITA' DI ACCUMULO	//	N.C.	N.C.		
	7.7 globale	1.4 ; 6.2 ==> ISO 13790 - Modello 1 C - 5 R (sup.climatizzata coincidente con sup. lorda)	Light construction - medium construction - heavy construction	medium construction (desunto da periodo e tecnologia costruttiva) Cm_Af : Internal heat capacity per unit of air conditioned area = 165000 J/Km2		
	7.8 chiusura verticale esterna	N.C.	N.C.	N.C.		
	7.9 chiusura orizzontale di base					
7.10 chiusura orizzontale di copertura						
7.11 interna						

		LOD 1	LOD 1_CEA (ISO 13790 - 5R + 1C)	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3
8. modello energetico subsistema impianti	8.1 tipologia e modalità di gestione (autonomo/centralizzato)		heat_starts : Start of the heating season; heat_ends : End of the heating season	22/11-23/03		
	8.2 rendimento globale medio stagionale	1.3 ; 2.1 ==> fonte (ENEA, TABULA, Istat] **non sempre disponibile perché funzione dell'area geografica e della tecnologia costruttiva, in questi casi si ricorre ai rendimenti stagionali della UNI TS 11300**	efficiency for the heating and hot water system : efficiency of the all in one system (cfr. TAB. 8)	0.8		
	8.3 tipologia sistema di generazione		Description for the heating and hot water (natural gas-fired boiler, electrical boiler, heatpump - air/air; etc..) (cfr. TAB. 8)	natural gas-fired boiler;		
			Tsww0_C : Typical supply water temperature;	Tsww0_C = 60 °C;		
			Vww_ldp Peak specific daily hot water consumption + (cfr. TAB 10)	Vww_ldp = 35 l/h*person		
	8.3.1 Stato degli impianti	Effettuazione di interventi di ristrutturazione riguardanti gli impianti	Tipo di intervento effettuato sugli impianti (cfr. TAB 9)	Interventi di realizzazione di impianti autonomi (distacco da impianti centralizzati)		
	8.4 specifiche sistema di generazione	N.C.	N.C.	N.C.		
8.5 tipo e specifiche sistema di distribuzione	N.C.	N.C.				

ALLEGATO 1.6 – Matrice dati di input – LOD 1: Metodologia + caso studio

		LOD 1	LOD 1_CEA (ISO 13790 - 5R + 1C)	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3
8. modello energetico subsistema impianti	8.6 tipo e specifiche sistema di emissione	Tipo di sistema di emissione	radiator 90-70	radiator 90-70;		
	8.7 tipo e specifiche di controllo climatico	2.1 ==> per tipologia impianto autonomo/centralizzato (per definire la Tset point)	Ths_set_C - Tset point Heating	19 °C		
	8.8 ACS	temperatura acqua calda sanitaria	temperatura acqua calda sanitaria	Medium temperature water (45 °C)		
	FONTI RINNOVABILI	dati satellitari (frequenza aggiornamento 1-2 anni)	N.C.	N.C.		
	8.9 termiche	N.C.				
	8.10 elettriche	N.C.				
	8.11 consumi elettrici	a livello di cabina				
	8.12 consumi gas	N.C.				

		LOD 1	LOD 1_CEA (ISO 13790 - 5R + 1C)	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3
9. profili di occupazione	9.1 numero di occupanti (valutazioni standard)	9.1 numero di occupanti (valutazioni standard)	6.2 ==> secondo appendice G12 ISO 13790	30 m2 per persona		
	9.2 numero di occupanti (valutazioni NON standard)	9.2 numero di occupanti (valutazioni NON standard)	N.C.			
	9.3 densità di occupazione spazio	9.2 / 6.2	9.2 / 6.2	9.2 / 6.2		
	9.4 destinazione d'uso di zona/vano	N.C.	N.C.	N.C.		
	9.5 eventuali suddivisioni (nuclei famigliari/ aree funzionali)	N.C.				
	9.6 profilo di occupazione spazio	1.1 ==> ISO 13790 - appendice G.12 (tempo di presenza giornaliero medio)	cfr. TAB 11	>		
	9.7 tasso metabolico/attività svolta	9.1; 9.2 ==> ISO 13790 - appendice G.12 (flusso termico medio per persona)	attività unica per destinazione d'uso generale - Qs_Wp Peak sensible heat load of people		70 W/person	

		LOD 1	LOD 1_CEA (ISO 13790 - 5R + 1C)	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3
10. illuminazione artificiale	10.1 tipologia sistema di illuminazione	N.C.	N.C.	N.C.		
	10.2 densità di luce (W/m2)	densità di luce (W/m2)	EI_Wm2 Peak specific electrical load due to artificial lighting (W/m2)	2.7 W/m2		
	10.3 programma di funzionamento	programma di funzionamento	cfr. TAB 12	>		
11. dotazione e uso di apparecchiature elettriche	11.1 apporti interni (W/m2)	apporti interni (W/m2)	Ea_Wm2 Peak specific electrical load due to computers and devices (W/m2)	8 W/m2		
	11.2 programma di funzionamento	programma di funzionamento	cfr. TAB 13	>		
12. ventilazione naturale	12.1 modalità di ventilazione	tipologia di ventilazione	type_vent : Type of ventilation HVAC assembly (natural ventilation);	Window ventilation		
		tasso di ricambio aria	Ve_1sp Minimum outdoor air ventilation rate per person for Air Quality (l/s*person)	8.3 l/s*person		
		infiltrazione aria	n50 - Air exchanges per hour at a pressure of 50 Pa [1/h] (cfr. TAB 12.1)	Medium		

ALLEGATO 1.9 – Matrice dati di input – LOD 1: Metodologia + caso studio

		LOD 4	LOD 4_Energy+	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3
1. aspetti generali	1.1 destinazione generale	da sezioni di censimento ISTAT/da documentazione tecnica (licenze edilizie,	cfr. tab. 0	n.7 edifici residenziali plurifamiliari		
	1.2 n.ro unità immobiliari presenti	da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ	definito dall'utente	N° 3 O.E. con 8 unità immobiliari	N° 13 O.E. con 8 unità immobiliari	N° 4 O.E. con 20 unità immobiliari
	1.3 località/area geografica	coordinate geografiche da S.I.T.	specificare LAT e LONG (°)	41° 6'25.36"N - 16°52'54.92"E (area geografica)		
	1.4 tipologia e tecnologia costruttiva	[2.1] ==> tipologia e tecnologia costruttiva rappresentativa dell'intero edificio	da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ	edificio a struttura mista muratura - c.a.	edificio a struttura mista muratura - c.a.	edificio a telaio in c.a.
	1.5 aspetti normativi	sistema vincolistico prescrittivo	sistema vincolistico prescrittivo (regolamento edilizio, NTA, leggi e delibere)	piano di zona relativo alla realizzazione di edifici residenziali pubblici		

		LOD 4	LOD 4_Energy+	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3
2. aspetti temporali	2.1 periodo/anno di costruzione	anno di costruzione da sezioni di censimento ISTAT/doc. tecnica	cfr. tab. 2.	1 edificio tra 1946-1960 (tipo 3)	4 edifici 1961-1970 (TIPO 1)	2 edifici 1971-1980 (TIPO 2)
	2.2 incremento volume	da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ	>	nessun incremento di volume rilevato		
	2.3 retrofit energetico/ristrutturazioni	da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo	>	nessun intervento sull'involucro eseguito (valutazione effettuata sulla base delle delibere pubblicate dall'autorità di gestione del patrimonio edilizio); non conoscenza di eventuali modifiche agli impianti		
3. dati meteorologici (valutazioni standard)	3.1 T, UR, v, l. ecc	anno tipo (.epw format) stazione meteo di riferimento (città)	anno tipo (.epw format) - disponibile dal portale Energy+	stazione meteo Bari-Palese		
4. dati meteorologici (diagnosi energetica)	4.1 T, UR, v, l. ecc	da misure locali dei parametri meteorologici	Utilizzati per la fase di validazione	N.C.		
5. dati meteorologici (termografie)	5.1 T, v	da misure locali eseguite con termocamera agli infrarossi e anemometro a ventolina	Impiegato ai fini della determinazione della trasmittanza termica	Temperatura dell'aria esterna media rilevata = 11 °C ; velocità media dell'aria rilevata (componente tangenziale ai prospetti) = 0.4 m/s		

ALLEGATO 2.2 – Matrice dati di input – LOD 4: Metodologia + caso studio

		LOD 4	LOD 4_Energy+	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3
6. dati geometrici:	6.1 altezza complessiva	da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ/da S.I.T.	importata dal modello .gbXML	importata dal modello .gbXML		
	6.2 superficie di piano					
	6.3 chiusura verticale esterna					
	6.4 profondità corpo di fabbrica					
	6.5 chiusura di copertura					
	6.6 chiusura orizzontale di base					
	6.7 superfici involucranti non riscaldate	da rilievo termico	definizione delle zone non riscaldate	N.C.	Parte dei piani rialzati non occupati	N.C.
	6.8 altezza di interpiano media	da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ	H int. Medio definito dall'utente	3,10 m (ipotizzato)	3,10 m	3,10 m
	6.9 numero di piani	H tot [6.1]/h interpiano [6.8]	H tot [6.1]/h interpiano [6.8]	4	10	4
	6.10 suddivisione spazio interno	da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ	importata dal modello .gbXML	IPOZZATA	da PIRP "San Marcello"	da doc. tecnica
	6.11 schermature solari fisse	da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ	tipologia di schermatura	aggetto orizzontale su alcune finestre (indicazione riportata nel modello gbxml)		
			aspetti geometrici (altezza, larghezza, distanza dalle aperture finestrate)	importata dal modello gbxml		
6.12 vol. non risc. (incluso l'interrato)	da documentazione tecnica (licenze edilizie, archivio)/da rilievo in situ	importata dal modello .gbXML	N.C.	Parte dei piani rialzati non occupati	N.C.	

ALLEGATO 2.3 – Matrice dati di input – LOD 4: Metodologia + caso studio

		LOD 4	LOD 4_Energy+	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3
7. modello energetico subsistema edilizio	7.1 zone termiche (riscaldare)	multizona	definito all'interno del modello energetico	zona termica coincidente con ciascuna unità immobiliare		
	7.2 chiusura verticale opaca	definizione della chiusura di involucro	1.3 ; 1.4 ; 2.1 ==> tecnologia costruttiva componente edile [secondo UNI/TR 11552 o TABULA (cfr. TAB. 4)	(muratura in mattoni pieni 30-38 cm) - soluzione monostrato in laterizio/tufo		
			5.1 ==> U_wall - Thermal transmittance of wall including linear losses (+10%) [secondo relazioni analitiche sperimentali]	U_wall = 0.95 W/m2K;	U_wall = 0,91 W/m2K;	U_wall = 0.79 W/m2K;
			a_wall : Solar absorption coefficient (cfr. TAB. 5)	white paint over plaster over clay brick- old building > a_wall = 0,3;		
			e_wall : Emissivity of external surface (cfr. TAB. 5)	e_wall= 0,84;		
			r_wall : Reflectance in the Red spectrum (cfr. TAB. 5)	r_wall=0,7		
			calore specifico, massa volumica, coefficiente di conducibilità termica	secondo banca dati software di calcolo		
	7.3 chiusura orizzontale di base	definizione della chiusura di involucro	1.3 ; 1.4 ; 2.1 ==> tipologia di chiusura [secondo UNI/TR 11552 o TABULA (cfr. TAB. 4)	Solaio latero-cementizio		
			1.3 ; 1.4 ; 2.1 ==> U_base : Thermal transmittance of floor including linear losses (+10%). [secondo UNI/TR 11552 o TABULA] (cfr. TAB. 4)	U_base = 0.94 W/m2K	U_base = 0.94 W/m2K	U_base = 0.98 W/m2K
			calore specifico, massa volumica, coefficiente di conducibilità termica	secondo banca dati software di calcolo		

		LOD 4	LOD 4_Energy+	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3	
7. modello energetico subsistema edilizio	7.4 chiusura orizzontale di copertura	definizione della chiusura di involucro	1.3 ; 1.4 ; 2.1 ==> tipologia di chiusura [secondo UNI/TR 11552 o TABULA] (cfr. TAB. 4)	Solaio latero-cementizio		Solaio latero-cementizio - basso livello di isolamento termico	
			1.3 ; 1.4 ; 2.1 ==> U_roof : Thermal transmittance of roof including linear losses (+10%) (cfr. TAB. 4)	U_roof = 1.10 W/m2K;	U_roof = 1.10 W/m2K;	U_roof = 0.75 W/m2K;	
			a_roof : Solar absorption coefficient (cfr. TAB. 6)	piastrelle di argilla - vecchia costruzione > a_roof=0.55;			
			e_roof : Emissivity of external surface (cfr. TAB. 6)	e_roof= 0.91			
			r_roof : Reflectance in the Red spectrum (cfr. TAB. 6)	r_roof=0.44			
			calore specifico, massa volumica, coefficiente di conducibilità termica	secondo banca dati software di calcolo			
	7.5 chiusure trasparenti (telaio, vetro, P.T.)	definizione della chiusura di involucro	1.3 ; 1.4 ; 2.1 ==> tipologia di serramento (cfr. TAB. 4)	Vetro singolo, telaio in legno		Vetro-camera con intercapedine d'aria, telaio in metallo senza telaio	
			1.3 ; 1.4 ; 2.1 ==> 'U_win : Thermal transmittance of windows including linear losses (+10%) (cfr. TAB. 4)	Uwin = 4.90 W/m2K;	Uwin = 4.90 W/m2K;	Uwin = 3.70 W/m2K;	
			G_win : Solar heat gain coefficient (cfr. TAB. 7)	G_win = 0.85;			
			e_win : Emissivity of external surface (cfr. TAB. 7)	e_win=0.89;			
			F_F : Window frame fraction coefficient (cfr. TAB. 7)	F_F=0.2;			
			WWR N /S/E/O	determinato a partire dal modello gbxml			
	7.6 stratigrafia partizioni interne	definizione delle partizione interna	calore specifico, massa volumica, coefficiente di conducibilità termica	secondo banca dati software di calcolo			
CAPACITA' DI ACCUMULO	//						
7.8 chiusura verticale esterna	da modello energetico	da modello energetico	da modello energetico				
7.9 chiusura orizzontale di base							
7.10 chiusura orizzontale di copertura							
7.11 interna							

		LOD 4	LOD 4_Energy+	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3
8. modello energetico subsistema impianti	8.1 tipologia e modalità di gestione (autonomo/centralizzato)	1.3 ; 2.1 ==> fonte (ENEA, TABULA, Istat] **non sempre disponibile	heat_starts : Start of the heating season; heat_ends : End of the heating season	22/11-23/03		
	8.2 rendimento globale medio stagionale	perché funzione dell'area geografica e della tecnologia costruttiva, in questi casi si ricorre ai rendimenti stagionali della UNI TS 11300**	determinato in funzione dei rendimenti dei vari sottosistemi	N.C.		
	8.3 Stato degli impianti	Effettuazione di interventi di ristrutturazione riguardanti gli impianti	Tipo di intervento effettuato sugli impianti (cfr. TAB 9)	Interventi di realizzazione di impianti autonomi (distacco da impianti centralizzati)		
	8.4 tipologia e specifiche sistema di generazione	1.3 ; 2.1 ==> fonte (ENEA, TABULA, Istat]	Tipo di generatore di calore (cfr. TAB. 8)	natural gas-fired boiler;		
			Tipo di combustibile	gas metano		
		fonte UNI TS 11300-2/4	rendimento di generazione (cfr. tab.11.1)	0,73		
		Consumo giornaliero di ACS	hot water consumption funzione della superficie (cfr. TAB 10.1)	importato dal modello gbXML in funzione della superficie		
8.5 tipo e specifiche sistema di distribuzione	fonte UNI TS 11300-2	rendimento di distribuzione (cfr. tab.11.1)	0,95			

	LOD 4	LOD 4_Energy+	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3	
8. modello energetico subsistema impianti	8.6 tipo e specifiche sistema di emissione	1.3 ; 2.1 ==> fonte (ENEA, TABULA, Istat]	tipologia di terminale di emissione	radiator 90-70;		
		fonte UNI TS 11300-2	rendimento di emissione (cfr. tab.11.1)	0,95		
	8.7 tipo e specifiche di controllo climatico	2.1 ==> per tipologia impianto autonomo/centralizzato (per definire la Tset point)	Ths_set_C - Tset point Heating	19 °C		
		fonte UNI TS 11300-2	rendimento di regolazione climatica (cfr. tab.11.1)	0,93		
	8.8 ACS	temperatura acqua calda sanitaria	temperatura acqua calda sanitaria	Medium temperature water (45 °C)		
	FONTI RINNOVABILI	dati satellitari (frequenza aggiornamento 1-2 anni)	//	N.C.		
	8.9 termiche	tipo e specifiche di impianto	N.C.			
	8.10 elettriche	tipo e specifiche di impianto	N.C.			
	8.11 consumi elettrici	a livello di cabina	finalizzato alla validazione del modello	si considera il consumo procapite per abitante residente (dato da database M.U.S.I.C.A. - Bari)		
	8.12 consumi gas	a livello di intero quartiere	finalizzato alla validazione del modello			

		LOD 4	LOD 4_Energy+	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3
9. profili di occupazione	9.1 numero di occupanti (valutazioni standard)	N.C.				
	9.2 numero di occupanti (valutazioni NON standard)	9.2 numero di occupanti (valutazioni NON standard)	da sezioni di censimento ISTAT	2 persone/unità immobiliare (421 persone/(208 u.i.)		
	9.3 densità di occupazione spazio	9.2 / 6.2	9.2 / 6.2	0,023 persone mq	0,042 persone mq	0,03 persone/mq
	9.4 destinazione d'uso di zona/vano	6.10; 9.2 ==> destinazione di zona	destinazione di zona	importato da modello .gbxml (soggiorno pranzo, cucina, bagno, letto)		
	9.5 eventuali suddivisioni (nuclei famigliari/)	6.10; 9.2 ==> eventuale suddivisione nuclei famigliari	N.C.			
	9.6 profilo di occupazione spazio	9.4 ==> profilo occupazione	profilo di occupazione giornaliero cf. tab.13.1	importato da modello .gbxml		
	9.7 tasso metabolico/attività svolta	9.4 ==> tasso metabolico	ANSI/ASHRAE Standard 55-2010 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy - Appendix A - Activity Levels	attività domestiche		

		LOD 4	LOD 4_Energy+	CASO STUDIO - CLUSTER 1	CASO STUDIO - CLUSTER 2	CASO STUDIO - CLUSTER 3
10. illuminazione artificiale	10.1 tipologia sistema di illuminazione	N.C.				
	10.2 densità di luce (W/m2)	densità di luce (W/m2)	El_Wm2 Peak specific electrical load due to artificial lighting (W/m2)	2.7 W/m2		
	10.3 programma di funzionamento	programma di funzionamento	cfr. TAB 12	>		
11. dotazione e uso di apparecchiature elettriche	11.1 apporti interni (W/m2)	apporti interni (W/m2)	Ea_Wm2 Peak specific electrical load due to computers and devices (W/m2)	8 W/m2		
	11.2 programma di funzionamento	programma di funzionamento	cfr. TAB 13	>		
12. ventilazione naturale	12.1 modalità di ventilazione	tipologia di ventilazione	type_vent : Type of ventilation HVAC assembly (natural ventilation);	Window ventilation		
		tasso di ricambio aria	Ve_lsp Minimum outdoor air ventilation rate per person for Air Quality (l/s*person)	8.3 l/s*person		
		infiltrazione aria	n50 - Air exchanges per hour at a pressure of 50 Pa [1/h] (cfr. TAB 12.1)	Medium		

TAB. 0 Consultare sezioni di censimento ISTAT	
Destinazione generale	
1	Residenziale
2	Uffici
3	Mista residenziale-uffici
4	Residenza stagionale

TAB. 1 Consultare sezioni di censimento ISTAT	
Tecnologia costruttiva	
E5	Edifici ad uso residenziale in muratura portante
E6	Edifici ad uso residenziale in calcestruzzo armato
E7	Edifici ad uso residenziale in altro materiale (acciaio, legno, ecc.)

TAB. 2 Consultare sezioni di censimento ISTAT	
Periodi costruttivi	
E8	Edifici ad uso residenziale costruiti prima del 1919
E9	Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1919 al 1945
E10	Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1946 al 1960
E11	Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1961 al 1970
E12	Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1971 al 1980
E13	Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1981 al 1990
E14	Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1991 al 2000
E15	Edifici ad uso residenziale costruiti dal 2001 al 2005
E16	Edifici ad uso residenziale costruiti dopo il 2005

TAB. 3 Fonte: CEA – City Energy Analyst	
Tipo di schermature solari	
Coefficiente di ombreggiatura	
nessuno	1
tapparella	0.08
veneziana tenda	0.15

TAB. 4

Fonte: TABULA

anno di costruzione	Chiusura verticale opaca		Chiusura orizzontale di base	
	tecnologia costruttiva	U (W/m2K)	tecnologia costruttiva	U (W/m2K)
ante 1900	Muratura di pietra listata con mattoni (60 cm)	1.19	Solaio a volte in laterizio	1.07
1901-1920	Muratura in mattoni pieni (38 cm)	1.19	Solaio in legno e tavelle in laterizio	1.20
1921-1945	Muratura in mattoni pieni (38 cm)	1.48	Soletta in calcestruzzo armato	1.23
1946-1960	Muratura in mattoni pieni (38 cm)	1.48	Solaio latero-cementizio	0.94
1961-1975	Muratura a cassa-vuota con mattoni forati (30 cm)	1.15	Solaio latero-cementizio	0.94
1976-1990	Muratura in mattoni forati (25 cm), basso livello di isolamento	0.80	Solaio latero-cementizio, basso livello di isolamento	0.98

TAB. 4

Fonte: TABULA

anno di costruzione	Chiusura orizzontale di copertura		Chiusure trasparenti	
	tecnologia costruttiva	U (W/m2K)	tecnologia costruttiva	U (W/m2K)
ante 1900	Solaio a volte in laterizio	1.28	Vetro singolo, telaio in legno	4.90
1901-1920	Solaio in legno e tavelle in laterizio	1.54	Vetro singolo, telaio in legno	4.90
1921-1945	Soletta in calcestruzzo armato	1.48	Vetro singolo, telaio in legno	4.90
1946-1960	Solaio latero-cementizio	1.10	Vetro singolo, telaio in legno	4.90
1961-1975	Solaio latero-cementizio	1.10	Vetro singolo, telaio in legno	4.90
1976-1990	Solaio latero-cementizio, basso livello di isolamento	0.75	Vetro-camera con intercapedine d'aria, telaio in metallo senza taglio termico	3.70

TAB. 5 Fonte: CEA – City Energy Analyst				
Coefficienti di assorbimento, emissione e riflessione solare - CHIUSURE VERTICALI OPACHE				
		a	e	r
1	mattoni in argilla comune rosso a vista - nuova	0.68	0.92	0.32
2	blocco di cemento a vista - vecchio edificio	0.6	0.95	0.4
3	vernice bianca su intonaco su mattoni di argilla: vecchio	0.3	0.84	0.7
4	blu scuro su intonaco su mattoni di argilla - nuova	0.65	0.9	0.35
5	dark paint over plaster over clay brick - new building	0.85	0.94	0.15
6	blocco di cemento a vista-NTU	0.6	0.95	0.4
7	tramezzatura interna in laterizio	0.6	0.95	0.4
8	tramezzatura interna in cartongesso	0.6	0.95	0.4

TAB. 6 Fonte: CEA – City Energy Analyst				
Coefficienti di assorbimento, emissione e riflessione solare - CHIUSURE ORIZZONTALI DI COPERTURA				
		a	e	r
1	finitura in cemento o ciottoli di roccia - nuova costruzione	0.6	0.94	0.4
2	piastrelle in argilla - vecchia costruzione	0.55	0.91	0.45
3	piastrelle in alluminio - vecchia costruzione	0.3	0.09	0.7
4	verde - tetto nuovo	0.5	0.95	0.5
5	vernice bianca su intonaco su cemento - tetto nuovo	0.3	0.84	0.7
6	vernice scura su intonaco su cemento - tetto nuovo	0.85	0.94	0.15
7	finitura in cemento o ciottoli di roccia - Singapore	0.6	0.94	0.4

TAB. 7 *				
Coefficiente di guadagno solare, emmissività, rapporto telaio/finestra - CHIUSURE TRASPARENTI				
		G_win	e_win	F_F
1	vetro singolo	0.85	0.89	0.2
2	vetro doppio	0.75	0.89	0.2
3	doppio vetro con Argon	0.75	0.89	0.2
4	doppio vetro basso emissivo	0.67	0.02	0.2
5	triplo vetro	0.7	0.89	0.2
6	triplo vetro con due rivestimenti selettivi basso emissivi	0.5	0.02	0.2
7	doppia finestra	0.75	0.89	0.2
8	vetro singolo - HDB	0.85	0.89	0.2
9	finestra - NTU	0.29	0.89	0.2
10	finestra - Ufficio SinBERBest	0.2	0.89	0.2

TAB. 8 *		
IMPIANTI RISCALDAMENTO + ACS		
Descrizione per il riscaldamento e l'acqua calda - efficienza del sistema		
1	caldaia a gasolio	0.8
2	forno a carbone	0.6
3	caldaia alimentata a metano	0.8
4	boiler elettrico	0.9
5	forno a legna	0.6
6	pompa di calore - suolo/acqua	4
7	pompa di calore - aria/aria	2.7
8	pompa di calore - acqua/acqua	3

TAB. 9	
Tipo di intervento effettuato sull'impianto	
A	Stato originario/nessun intervento
B	Ristrutturazione comune
C	Ristrutturazione avanzata

*Fonte dati: CEA – City Energy Analyst

TAB. 10 *																								
profilo di utilizzo ACS																								
Day/Hour																								
WEEKDAY	0.08	0.04	0.01	0.01	0.02	0.38	1	0.81	0.67	0.51	0.45	0.42	0.63	0.56	0.32	0.28	0.32	0.56	0.79	0.8	0.62	0.45	0.25	0.19
SATURDAY	0.09	0.1	0.06	0.02	0.02	0.12	0.33	0.56	0.91	0.9	0.81	0.87	0.88	0.7	0.56	0.44	0.56	0.72	1	0.79	0.44	0.43	0.35	0.21
SUNDAY	0.11	0.08	0.06	0.02	0.02	0.06	0.2	0.41	0.65	0.86	0.95	1	0.86	0.74	0.58	0.51	0.29	0.55	0.72	0.78	0.4	0.37	0.34	0.19

TAB. 11 *																								
profilo di occupazione spazio																								
Day/Hour																								
WEEKDAY	1	1	1	1	1	1	0.6	0.4	0	0	0	0	0.8	0.4	0	0	0	0.4	0.8	0.8	0.8	1	1	1
SATURDAY	1	1	1	1	1	1	0.6	0.4	0	0	0	0	0.8	0.4	0	0	0	0.4	0.8	0.8	0.8	1	1	1
SUNDAY	1	1	1	1	1	1	0.6	0.4	0	0	0	0	0.8	0.4	0	0	0	0.4	0.8	0.8	0.8	1	1	1

TAB. 12 *																								
programma di funzionamento illuminazione artificiale																								
Day/Hour																								
WEEKDAY	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.8	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.8	1	0.2	0.2	0.2	0.1
SATURDAY	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.8	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.8	1	0.2	0.2	0.2	0.1
SUNDAY	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.8	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.8	1	0.2	0.2	0.2	0.1

TAB. 13 *																								
programma di funzionamento apparecchiature elettriche																								
Day/Hour																								
WEEKDAY	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.8	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.8	1	0.2	0.2	0.2	0.1
SATURDAY	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.8	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.8	1	0.2	0.2	0.2	0.1
SUNDAY	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.8	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.8	1	0.2	0.2	0.2	0.1

*Fonte dati:
CEA – City Energy Analyst

TAB. 10.1

profilo di utilizzo ACS

Secondo UNI TS 11300-2: 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 - PROSPETTO 30

TAB. 11.1

rendimenti

Secondo UNI TS 11300-2: 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 - PROSPETTI 17-20-21-23-25-26-28

TAB. 12.1 *Fonte dati: CEA – City Energy Analyst**n50 : Scambi d'aria orari ad una pressione di 50 Pa/ UNIT: [1/h] - caratteristiche involucro - perambilità all'aria**

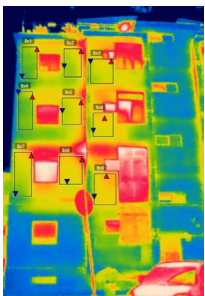
nessuna permeabilità	1	media permeabilità	4
bassa permeabilità	2	permeabile	5
media	3	molto permeabilità	6

TAB. 13.1**profili di occupazione ed uso dello spazio**

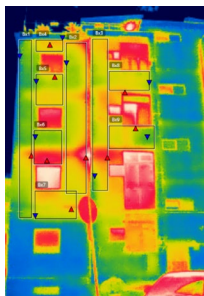
secondo: *Jiasha Fu; Shan Hu; Xin He; Shunsuke Managi; DaYan. Identifying residential building occupancy profiles with demographic characteristics: using a national time use survey data. Energy and Buildings, Volume 277, 15 December 2022, 112560.*

TIPO

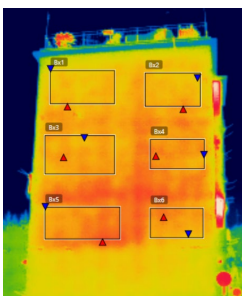
1



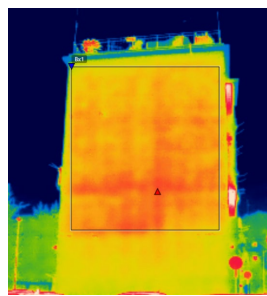
Umur =
0,70 W/m²K



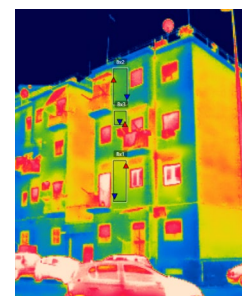
Uglobale =
0,77 W/m²K



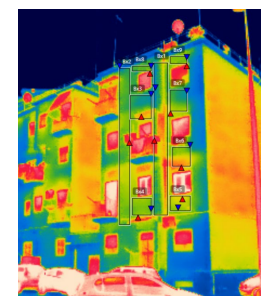
Umur =
1,21 W/m²K



Uglobale =
1,23 W/m²K



Umur =
0,67 W/m²K

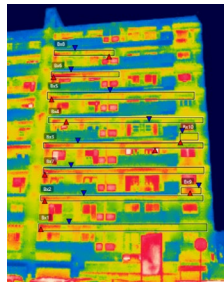


Uglobale =
0,72 W/m²K

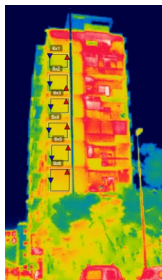
2



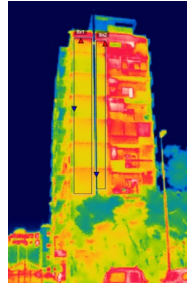
Umur =
0,61 W/m²K



Uglobale =
0,86 W/m²K



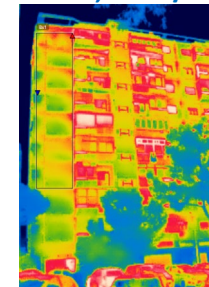
Umur =
0,67 W/m²K



Uglobale =
0,72 W/m²K

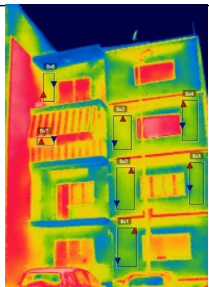


Umur =
0,73 W/m²K

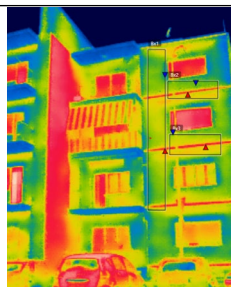


Uglobale =
0,78 W/m²K

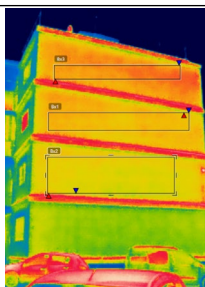
3



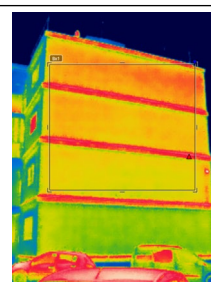
Umur =
0,57 W/m²K



Uglobale =
0,78 W/m²K



Umur =
0,71 W/m²K



Uglobale =
0,87 W/m²K

10. CURRICULUM VITAE

INFORMAZIONI

Dott. Ing. Riccardo Chieppa



riccardo.chieppa@poliba.it

ISTRUZIONE

- 2020 – 2023 **PhD candidate**
Dottorato di Ricerca in Rischio, Sviluppo Ambientale, Territoriale ed Edilizio
(XXXV Ciclo) – Politecnico di Bari (Italia)
- 2016 – 2018 **Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi (LM-24)**
Politecnico di Bari (Italia)
conseguita nel 2018
voto di laurea: 110 e LODE
tesi di laurea in SERVIZI TECNOLOGICI E DA FONTI RINNOVABILI (ICAR-10)
- 2013 – 2016 **Laurea in Ingegneria Edile (L-23)**
Politecnico di Bari (Italia)
Conseguita nel 2016
voto di laurea: 110 e LODE
tesi di laurea in ARCHITETTURA TECNICA (ICAR-10)
- 2013 **Diploma di maturità scientifica**
Voto di maturità: 100/100