



Ricerca di Sistema elettrico

Efficientamento energetico del patrimonio edilizio: approcci, strumenti e metodologie

S. Pili, E. Loria, F. Poggi, C. Frau

EFFICIENTAMENTO ENERGETICO DEL PATRIMONIO EDILIZIO: APPROCCI, STRUMENTI E METODOLOGIE
S. Pili, E. Loria, F. Poggi, C. Frau

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo 1: *Tecnologie: presidiare e sviluppare tecnologie di prodotto e di processo essenziali per la transizione energetica*

Progetto: Tema 1.5 "Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti

Work package 1: Edifici ad alta efficienza energetica

Linea di attività: 1.26 Efficientamento energetico del patrimonio edilizio: approcci, strumenti e metodologie

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi ENEA

Responsabile del Work package: Domenico Iatauro ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Metodologie e strumenti per lo sviluppo di strategie di riqualificazione del patrimonio edilizio esistente*"

Responsabile scientifico ENEA: Giovanni Puglisi

Responsabile scientifico SOTACARBO: Marcella Fadda

Hanno collaborato alle attività descritte nel presente documento: Giulia Cau, Marcella Fadda, Enrico Maggio e Alberto Pettinau.

Indice

SOMMARIO	5
1 INTRODUZIONE.....	6
1.1 CONTESTO TEORICO DI SFONDO	6
2 ANALISI DELLO STATO DELL'ARTE	10
2.1 SMART CITY ED EFFICIENZA ENERGETICA NEGLI EDIFICI	10
2.1.1 <i>Il concetto di SMART City</i>	10
2.1.2 <i>La Smart Energy City (SEC)</i>	16
2.1.2.1 La SMART Grid.....	17
2.1.2.2 Il ruolo del patrimonio edilizio nella SMART City	20
2.1.2.3 Lo SMART Building	20
2.1.2.4 Sistemi di controllo e SMART Meter	22
2.1.3 <i>SMART City nel quadro Europeo</i>	25
2.1.3.1 Progetti europei inerenti la SEC	29
2.2 IL PROCESSO PROGETTUALE E GLI APPROCCI TIPOLOGICI	33
2.2.1 <i>Linee guida e approcci tipologici</i>	35
2.2.1.1 Linee guida per edifici pubblici.....	37
2.2.1.2 Linee guida per edifici storici.....	38
2.2.1.3 Approccio tipologico nella strategia comunitaria	40
2.3 MODELLAZIONE ENERGETICA DEL PATRIMONIO EDILIZIO A SCALA URBANA	42
2.3.1 <i>Caratteristiche generali</i>	42
2.3.2 <i>Approccio per la stima del potenziale di una tecnologia di retrofit</i>	44
2.3.3 <i>Approcci alla modellazione energetica</i>	47
2.3.3.1 Approcci statistici alla modellazione	49
2.3.3.2 Modelli analitici ingegneristici.....	51
2.3.4 <i>Dati di ingresso</i>	55
2.3.5 <i>Dimensione spaziale</i>	57
2.3.6 <i>Approccio tipologico</i>	58
2.3.7 <i>Calibrazione e Validazione</i>	60
2.3.8 <i>Modelli integrati in ambiente GIS</i>	63
3 METODOLOGIA.....	67
3.1 OBIETTIVO DELLA RICERCA	67
3.2 APPROCCIO METODOLOGICO GENERALE	70
3.3 FASI DELLA RICERCA.....	71
3.4 FASE DI ANALISI PRELIMINARE E LAYERS DEL CONTESTO	74
3.5 LAYER DEL PATRIMONIO EDIFICATO.....	75
3.5.1 <i>Dati topografici di ingresso</i>	76
3.5.2 <i>Attività di rilievo</i>	76
3.5.3 <i>Scelta dell'approccio tipologico</i>	77
3.5.4 <i>Modellazione energetica e validazione</i>	78
3.6 L'ABACO GEOGRAFICO	80
3.7 LAYER DEL PATRIMONIO PUBBLICO.....	84
3.8 SVILUPPO DI UNA RETE MESH DI SENSORI INNOVATIVI	87
3.9 MAPPA PRELIMINARE DEGLI UTENTI DEL PORTALE.....	89
3.9.1 <i>Identificazione preliminare degli interessi dei gruppi di attori principali</i>	89
3.10 SCHEMA PRELIMINARE DELLA STRUTTURA DEL PORTALE	91
3.11 APPROCCIO PARTECIPATIVO	94
4 RISULTATI E CONCLUSIONI	95
4.1 URBAN BUILDING ENERGY MODELING (UBEM).....	95
4.2 APPROCCIO METODOLOGICO.....	96

4.3	ANALISI PRELIMINARE DEL CASO STUDIO DI CARBONIA.....	97
4.3.1	<i>Dati geometrici</i>	97
4.3.2	<i>Dati patrimonio edilizio</i>	98
4.3.3	<i>Dati uso del patrimonio</i>	100
5	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	102

Sommario

La transizione verso modelli insediativi più sostenibili, e nello specifico il miglioramento della efficienza energetica del patrimonio edificato esistente, responsabile di circa il 40% delle emissioni di gas serra e di circa il 25% degli usi finali energetici nell'Europa dei 28, è una delle strategie chiave per l'ambizioso traguardo per il 2050. Nonostante lo sviluppo di tecnologie sempre più efficienti e le promettenti esperienze dei nuovi eco-quartieri, il patrimonio edificato europeo è ancora prevalentemente costituito da vecchi edifici con limitate prestazioni energetiche. Inoltre, i contesti urbani sono caratterizzati da una forte complessità di relazioni tra elementi materiali e immateriali stratificatesi nel tempo, che condiziona fortemente le possibilità di recupero ed efficientamento energetico del patrimonio immobiliare e il rinnovamento delle reti infrastrutturali della città.

La mancanza di conoscenza è individuata come uno dei principali fattori critici del processo di efficientamento del patrimonio immobiliare. L'aspetto più limitante consiste nella difficoltà di definire a priori il potenziale di efficientamento energetico di un edificio perché, oltre a essere strettamente dipendente dalle risorse economiche disponibili, è condizionato da limiti legati alle caratteristiche specifiche dell'immobile e del suo contesto e alla accessibilità del mercato locale alle diverse tecnologie. La mancanza di conoscenza ha effetto sui diversi attori coinvolti nel processo di efficientamento del patrimonio edilizio: gli operatori del settore, i fruitori finali dell'edificio, gli investitori e la Pubblica Amministrazione.

In questo panorama, l'obiettivo del progetto triennale nel suo complesso è definire una metodologia di studio e sperimentare uno strumento per supportare il processo di recupero ed efficientamento del patrimonio edilizio tramite un approccio multi scala, che integra la prospettiva del singolo edificio con quella urbana e di quartiere, in un'ottica partecipativa adattata a contesti di piccola o media dimensione, caratterizzati da limitato accesso a risorse economiche e umane.

L'attività di ricerca svolta in questo anno ha portato a tracciare il contesto teorico della ricerca e a definirne l'approccio metodologico generale. Dopo un discorso introduttivo sulla complessità del processo di recupero ed efficientamento energetico del patrimonio immobiliare, che ha portato a inquadrare le principali barriere alla diffusione delle nuove tecnologie, si sono presentati gli approcci del paradigma della SMART City e delle strategie Comunitarie.

Lo stato dell'arte è entrato poi più nel dettaglio degli approcci tipologici e nello sviluppo di strumenti di UBEM a supporto del processo urbano di recupero ed efficientamento del patrimonio edilizio. A tal riguardo si sono illustrati gli approcci ricorrenti attraverso una ricognizione della letteratura e si è sviluppata una metodologia analitica di studio che è stata utilizzata per alcuni casi specifici, che possono essere di indirizzo alla impostazione della metodologia riportati, in forma di scheda sintetica, nell'*Allegato 1* al presente documento. Dopo aver definito un quadro rappresentativo degli approcci più diffusi all'UBEM, viene descritto lo schema concettuale della metodologia che si intende sviluppare in questo progetto, esplicitandone per ogni parte i contenuti e i requisiti generali e sottolineando le criticità a cui la ricerca dovrà dare una risposta.

Infine si è presentato il caso studio di Carbonia (*Allegato 2* al presente documento), tramite l'analisi dei dati disponibili in formato OPEN, finalizzata a costruire la conoscenza di fondo, necessaria allo sviluppo del progetto e a individuare le principali criticità della baseline informativa del contesto.

Lo studio più approfondito di alcuni approcci di UBEM, per quanto non esaustivo rispetto alla numerosità dei casi studio ormai presenti in letteratura, ha portato a individuare i punti fermi delle metodologie più recenti ricavate dall'analisi dello stato dell'arte. I casi studio di riferimento sono stati scelti cercando di selezionare gli approcci che, per scala geografica o rilevanza, fossero di interesse per l'impostazione del progetto, considerando sia esempi ad ampio respiro, evidentemente supportati da forti risorse di tipo economico e umane (MIT Cambridge), che casi studio sviluppati nell'ambito di esperienze legate a piccole realtà urbane o, ancora, legati al contesto universitario.

1 Introduzione

1.1 Contesto teorico di sfondo

La transizione verso modelli insediativi più sostenibili, e nello specifico il miglioramento della efficienza energetica del patrimonio edificato esistente, responsabile di circa il 40% delle emissioni di gas serra e di circa il 25% degli usi finali energetici nell'Europa dei 28 (Eurostat, 2016), è una delle strategie chiave non solo per l'incalzante raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile SDGs al 2030, ma anche del più ambizioso traguardo per il 2050 (Commissione Europea) [1]. La riedizione della direttiva europea sulla efficienza energetica negli edifici (Direttiva 2010/31/CE EPBD recast, e la successiva Direttiva 2018/844) [2] introduce l'importante concetto dell'edificio a energia quasi zero (nearly Zero Energy Building- nZEB), come un edificio ad alta efficienza dove il fabbisogno quasi nullo di energia deve essere prevalentemente coperto da fonti rinnovabili prodotte in loco. Gli stati membri devono provvedere a definire i requisiti specifici dei nZEB, basati sulle specificità climatiche, e del patrimonio edilizio locale, al fine di raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni di CO₂ del settore, specialmente per quanto riguarda il patrimonio pubblico.

In Italia la normativa richiede che le nuove costruzioni debbano essere adeguate al paradigma nZEB dal 2021 (dal 2019 per gli edifici pubblici), e definisce stringenti requisiti prestazionali per gli edifici interessati da ristrutturazioni. Tali requisiti sono proporzionali alla entità della ristrutturazione: gli interventi più invasivi implicano il rispetto di alti requisiti prestazionali per tutto il sistema edificio-impianto, mentre per gli interventi minori in genere è richiesto il rispetto di parametri che riguardano solo l'elemento di fabbrica rinnovato (D.Lgs. 19/08/2005 n.192 e ss.mm.ii, D.M. 26 giugno 2015).

Lo sviluppo tecnologico di involucri e impianti sempre più efficienti, unitamente alla diffusione della micro generazione da Fonti di Energia Rinnovabile (FER), delinea la possibilità di costruire nuovi edifici a consumo quasi zero; inoltre lo studio di soluzioni integrate nei corpi edilizi sembra fornire gli strumenti per la riqualificazione energetica del patrimonio esistente [3]. Parallelamente, i numerosi esempi di nuovi ecoquartieri o ecocittà mostrano le potenzialità del progetto sostenibile in fatto di riduzione dei consumi e delle emissioni e aumento della qualità degli ambienti interni e dello spazio pubblico [4].

Tuttavia il patrimonio edificato europeo è ancora prevalentemente costituito da vecchi edifici con limitate prestazioni energetiche e mostra il considerevole valore medio di fabbisogno energetico di circa 200 kWh/mq annuo [5]. In Italia più del 90% del patrimonio immobiliare è stato realizzato prima del 1991, ossia prima della entrata in vigore di una legge efficace per la limitazione del consumo energetico in edilizia, che fissasse con precisione le prestazioni energetiche degli elementi costruttivi e degli impianti [6].

La realizzazione di nuovi edifici o di nuove urbanizzazioni costituisce un'occasione privilegiata per applicare il paradigma della SMART City fin dalle prime fasi del progetto integrando le soluzioni tecnologiche volte alla realizzazione del nZEB con lo studio preliminare della morfologia urbana, delle reti infrastrutturali, dei materiali e dello spazio pubblico attraverso un approccio ecosistemico che promuova la sostenibilità di tutti i suoi elementi.

Al contrario, i contesti urbani consolidati sono caratterizzati da una forte complessità di relazioni tra elementi materiali e immateriali stratificatesi nel tempo, che ha limitati gradi di libertà e condiziona fortemente le possibilità di recupero ed efficientamento energetico del patrimonio immobiliare e il rinnovamento delle reti infrastrutturali della città. Per questo motivo sono molto rari i casi in cui le amministrazioni locali siano riuscite a sviluppare approcci strategici e attuare procedure efficaci, lasciando l'onere del rinnovamento del parco edilizio vetusto essenzialmente all'iniziativa privata dei singoli proprietari degli immobili, stimolati da politiche di incentivazione nazionale più o meno efficaci e centrate. Tuttavia senza una efficace strategia a livello urbano, che metta a sistema la propensione dell'investimento privato con le risorse finanziarie pubbliche in programmi di *retrofitting* e trasformazione urbana più complessi, non si potrà realisticamente influire sui consumi di un così vasto patrimonio edilizio caratterizzato da vetustà e inefficienza [7].

Il potenziale degli interventi di *retrofitting* è fortemente legato al contesto in cui questi si inseriscono e in special modo alle tipologie edilizie e costruttive con cui si devono integrare: sugli edifici altamente inefficienti è possibile ottenere miglioramenti di efficienza contenuti (tipicamente 10-30%) con interventi di costo

modesto, caratterizzati da ottimi tempi di ritorno dell'investimento, mentre la ricerca di alti valori di efficienza tramite interventi più profondi va necessariamente incontro ad alti e incerti tempi di ritorno, che sfavoriscono l'investimento [8]. In un'ottica strategica, questa evidenza porterebbe a favorire interventi di sostituzione integrale rispetto a interventi di *retrofitting*, tuttavia considerando anche le emissioni di gas serra collegate alla produzione dei nuovi corpi di fabbrica con metodologie di *Life Cycle Assessment* (LCA), numerosi studi stimano tempi di ritorno delle emissioni di CO₂ più favorevoli per gli interventi di ristrutturazione dell'esistente [9]. Inoltre il ricorso generalizzato alla demolizione e ricostruzione può creare una serie di impatti non facilmente prevedibili e quantificabili a priori, soprattutto se riferiti alle relazioni di tipo materiale e immateriale tra le comunità insediate e l'insieme stratificato di funzioni ed elementi fisici che caratterizzano un sistema urbano consolidato [10]. Il processo di demolizione e ricostruzione di vasti comparti richiede diversi anni di lavori, che producono impatti ambientali e sociali sull'ecosistema urbano e sulle attività economiche locali, generando fenomeni di esclusione sociale per la modifica al rialzo dei valori immobiliari e causando la perdita di luoghi urbani riconosciuti dalla cittadinanza, in favore di modelli sovrainposti [11].

D'altra parte, contrapponendosi al tradizionale approccio centralizzato alla pianificazione energetica, che considera la domanda come dato di input in continua crescita e la fornitura come una risposta solo orientata a minimizzare i costi e garantire la sicurezza tramite grossi impianti centralizzati, si fa strada il concetto della delocalizzazione della produzione tramite microgenerazione da FER e della modulazione della domanda energetica tramite azioni di efficientamento dei sistemi e programmazione della domanda [12]. L'approccio decentralizzato richiede il forte coinvolgimento delle amministrazioni locali che devono sviluppare un approccio multi scalare integrato con gli altri aspetti del territorio, molto lontano dalla tradizionale pianificazione energetica settoriale [13]. Soprattutto quando si scende alla scala urbana, tale inversione di paradigma si scontra con la generale mancanza di informazioni circa i consumi energetici e sulle caratteristiche fisico impiantistiche del patrimonio edificato, specialmente se si prende in considerazione il settore residenziale. Mentre le attività industriali e produttive sono più facilmente documentabili, in quanto fonti localizzate di forti consumi sottoposte a un alto livello di controllo, il consumo per usi residenziali è costituito da un universo di micro utenze per le quali è difficile avere dei dati spazialmente riferibili [14]: a causa di reti di distribuzione obsolete e, talvolta, della normativa di protezione della privacy, che limita la diffusione di informazioni sensibili, i dati di consumo sono generalmente resi noti in maniera aggregata per ampie parti del territorio e con un dettaglio orario non sempre disponibile a tutti i livelli di disaggregazione spaziale.

Il potenziale effettivo dei più efficienti sistemi per risparmio energetico e per la produzione da FER non è facilmente stimabile: le nuove tecnologie possono non essere applicabili negli edifici esistenti, sia per una semplice impossibilità tecnica, sia per costi non proporzionati ai benefici. Sotto il profilo normativo ci possono riscontrare blocchi con le istanze di tutela del paesaggio e dei beni culturali o con norme edificatorie non adeguate alla loro diffusione. Inoltre le diverse estrazioni culturali, anche di natura non tecnica, degli attori coinvolti, ostacolano la definizione di un quadro completo e condiviso delle possibilità offerte dalle tecnologie disponibili che, a causa della loro rapida evoluzione, è difficilmente tracciabile anche per gli operatori del settore.

Diversi studi hanno cercato di identificare le principali barriere allo sviluppo del mercato dell'efficientamento energetico del patrimonio immobiliare, in modo da indirizzare il progresso di politiche, strategie e strumenti adatti al loro superamento [15] [16] [17]:

- barriere economiche, legate ai fondi disponibili per l'efficientamento e alle modalità di accesso al credito;
- barriere tecniche, legate alle caratteristiche costruttive e ai materiali dell'edificio che possono favorire o escludere alcune tecnologie a priori;
- barriere normative, generalmente legate ai vincoli storico paesaggistici e ai regolamenti edilizi locali, ma che possono essere anche dipendenti dall'uso specifico a cui l'edificio è destinato;

- barriere gestionali, in quanto alcune tecnologie comportano complicazioni di tipo gestionale e amministrativo legate principalmente all'uso comune di alcuni spazi e servizi che ne possono scoraggiare l'adozione;
- barriere culturali, legate alla conoscenza delle tecnologie degli utenti finali ma anche degli operatori del settore o dei decisori della Pubblica Amministrazione (PA).

Lo studio delle barriere economiche è uno degli aspetti più consolidati in letteratura. La fattibilità economica di un impianto o di un rinnovamento edilizio viene generalmente analizzata tramite indicatori di rendimento consolidati (tempo di ritorno, VAN, flusso di cassa, etc), tuttavia l'interpretazione dei risultati rimane ancora un campo di studio aperto, perché fortemente legato alle preferenze dei proprietari o dei gestori dell'immobile e alle condizioni del contesto preso in considerazione. Le barriere economiche sono considerate tra le più impattanti sul potenziale di efficientamento: il parametro che sembra avere largamente più influenza è l'investimento iniziale, seguito dal tempo di ritorno. Su questi aspetti giocano un ruolo chiave il profilo socio-economico e il titolo di godimento dell'immobile, mentre in caso di edificio pubblico l'aspetto economico è legato alla destinazione d'uso dello stesso, alle priorità di spesa dell'ente e alla sua capacità di recuperare fondi per l'investimento iniziale.

Le barriere tecniche sono legate alla interazione tra la nuova tecnologia e il sistema edificio impianto esistente. In linea generale, negli edifici esistenti è buona norma ridurre l'invasione degli interventi per limitare la possibilità di incorrere in extra costi e imprevisti e di generare disagio agli occupanti. Le caratteristiche costruttive e lo specifico stato di conservazione dell'edificio possono favorire l'utilizzo di una tecnologia generalmente meno performante che in caso di nuove costruzioni ed escluderne a priori alcune. In caso di edifici di pregio storico, per esempio, sono solitamente da escludere per motivi paesaggistici gli interventi di isolamento esterno, perciò l'isolamento interno, che in genere è sconsigliato, diventa una opzione percorribile. Tuttavia spesso la dimensione degli ambienti interni può precludere l'utilizzo di tecnologie che richiedono forti spessori per raggiungere buoni limiti di resistenza termica, facendo diventare le soluzioni ad alto potere isolante le uniche soluzioni possibili. Tali soluzioni sono però caratterizzate da maggiori costi, minore diffusione nel mercato e da alcune peculiarità di messa in opera che possono inficiarne l'efficacia.

I limiti normativi sono legati al contesto locale e influiscono fortemente sul potenziale di diffusione di una tecnologia. Essi attengono principalmente alle norme che disciplinano l'uso del territorio con scopi di tutela paesaggistica e ambientale e controllo dell'attività edilizia in ambito urbano ed extraurbano. Alcuni edifici o intere aree possono essere gravati da divieti assoluti o da stringenti regole per l'installazione di tecnologie che alterino l'aspetto esterno dei manufatti edilizi.

La mancanza di conoscenza è individuata come uno dei principali fattori critici del processo di efficientamento del patrimonio immobiliare. L'aspetto più limitante consiste nella difficoltà di definire a priori il potenziale di efficientamento energetico di un edificio perché, oltre a essere strettamente dipendente dalle risorse economiche disponibili, è condizionato da limiti legati alle caratteristiche specifiche dell'immobile e del suo contesto e alla accessibilità del mercato locale alle diverse tecnologie. La mancanza di conoscenza ha effetto sui diversi attori coinvolti nel processo di efficientamento del patrimonio edilizio: gli operatori del settore, i fruitori finali dell'edificio, gli investitori e la PA. Gli operatori del settore, tanto i progettisti che la manodopera specializzata, possono non essere al corrente delle tecnologie disponibili e/o non avere le conoscenze per garantirne la corretta realizzazione e messa in esercizio. Questo può accadere perché le tecnologie sono in rapida evoluzione, e vi possono essere forti differenze di costo e disponibilità nei mercati locali. I fruitori degli edifici non sono in generale depositari di conoscenze tecniche, ma sono gli utilizzatori finali delle tecnologie e degli ambienti, inoltre, spesso coincidono con i decisori chiave che stanno investendo nel *retrofitting* energetico. Gli investitori necessitano di prospettive attendibili sull'efficacia delle tecnologie, che in alcuni casi possono richiedere attività di studio e ricerca non proporzionati all'entità dell'intervento di efficientamento e al valore del bene. I decisori della PA, oltre alla conoscenza delle opportunità offerte dalle nuove tecnologie, necessitano di avere un quadro sufficientemente rappresentativo delle caratteristiche del

patrimonio edilizio e dei consumi energetici a esso associato, per disegnare efficaci politiche di incentivazione e di supporto al processo di efficientamento.

Il dibattito scientifico sottolinea la centralità degli approcci strategici alla scala urbana, che possono essere la chiave per mettere a sistema le istanze bottom up provenienti dai proprietari degli edifici e dalle imprese locali con le politiche incentivanti nazionali, in un'ottica olistica di recupero sostenibile del patrimonio edilizio [18]. Al fine di superare le barriere ancora presenti alla transizione energetica del patrimonio edilizio, assume sempre più importanza lo sviluppo e la sperimentazione di metodologie e di strumenti a supporto della pianificazione energetica alla scala urbana, che è oggetto di un interessante dibattito di natura multi disciplinare [19]. Al momento sono in sperimentazione una gran quantità di approcci metodologico procedurali per indirizzare le azioni di piano che possono integrare strumenti di diversa complessità a supporto delle varie fasi del processo di ideazione ed attuazione delle strategie urbane [20].

Con riferimento a questo contesto teorico disciplinare, lo stato dell'arte sviluppato in questo lavoro propone un breve excursus sull'approccio SMART City adottato in sede europea, che vede nell'efficientamento energetico del patrimonio edilizio un suo elemento cardine, partendo dal concetto stesso che sta alla base del termine SMART City fino ad arrivare ad alcuni esempi di progetti europei che lo mettono in pratica. In seguito viene delineata l'importanza degli approcci tipologici nel progetto dell'efficientamento energetico degli edifici alla scala del singolo edificio e per definire strategie su base locale o settoriali, facendo cenno al ruolo che la digitalizzazione può avere tramite la diffusione dei metodi di Building Information Modeling (BIM), integrati con le opportunità offerte dalla nuova sensoristica (IOT, smart meter, etc) dedicata all'edificio (SMART Building). Infine lo stato dell'arte dedica un approfondimento maggiore agli strumenti e le metodologie per la stima del fabbisogno energetico alla scala urbana e di quartiere (Urban Building Energy Modeling - UBEM), che costituisce uno degli elementi centrali dell'approccio metodologico proposto in questa ricerca.

2 Analisi dello stato dell'arte

2.1 SMART City ed Efficienza Energetica negli edifici

2.1.1 Il concetto di SMART City

Sembra ormai diffuso il concetto di SMART City come un sistema urbano altamente permeato dalle moderne tecnologie della informazione, che possono integrare reti di sensori sviluppati per scopi specifici con altre fonti informative non strutturate (IOT, web, etc) in un paradigma di città efficiente e tecnologica mutuato da alcuni recenti esempi di fama mondiale [21]. Tuttavia, dare una definizione univoca di SMART City non è semplice: vi sono diversi autori che negli ultimi due decenni ne hanno enfatizzato alcuni aspetti confrontandoli anche con altri paradigmi di città presenti in letteratura al fine di definirne le relazioni (figura 2.1) [22]. Le definizioni sono passate da una accezione riduttiva accomunabile a quella di una città digitale (2.0 - 3.0 – 4.0), dando grande importanza alle capacità intrinseche dello strumento di autorganizzarsi in configurazioni ottimali del sistema, fino a comprendere nella accezione di “intelligente” i temi della inclusione sociale, qualità della vita e il più generale sviluppo sostenibile [23].

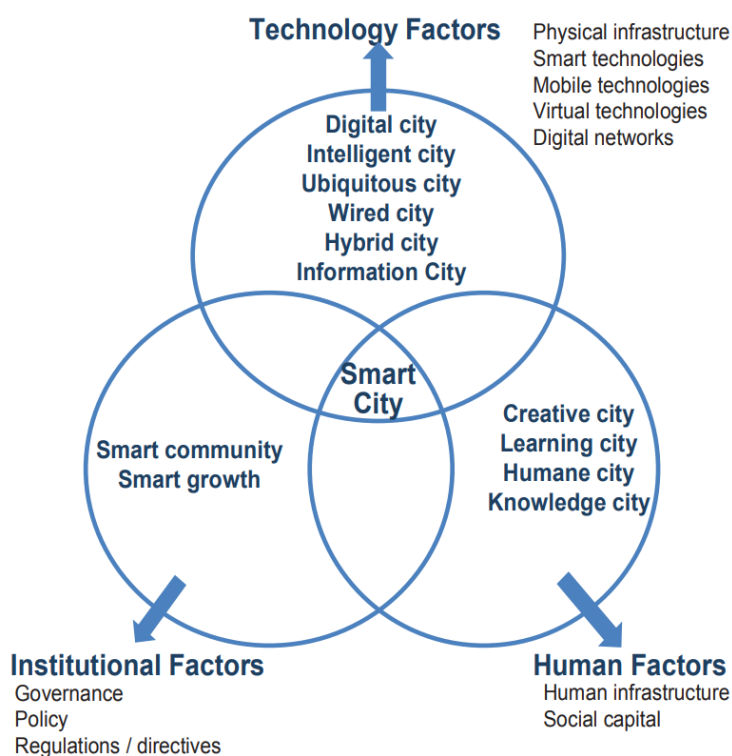


Figura 2.1. Sovrapposizione tra il concetto di SMART City altre definizioni di città (tratto da [22]).

Le numerose definizioni di SMART City elaborate negli anni, e le esigenze di promozione e marketing territoriale, hanno contribuito a creare l'idea che una città si possa definire SMART anche se conduce singole iniziative estemporanee e non coordinate. Al contrario, si è consolidata la convinzione che la realizzazione di una SMART City debba trarre origine dalla costruzione di una *vision* strategica, pianificata, organica e connessa alla capacità di leggere le potenzialità dei territori, da parte di un organo in grado di ripensare la città con una visione di lungo periodo e con un approccio integrato.

Un recente lavoro di confronto [24] ha raccolto alcune definizioni di SMART City rispetto alle tre sfere classiche di produzione della conoscenza e innovazione [25] nel quale si sono sviluppate, quali: la sfera accademica, quella economica e industriale, quella governativa o statale. Nella letteratura accademica, che include giornali scientifici e documenti sviluppati in ambiti universitari e para universitari, il concetto di SMART City copre un range molto ampio di idee alcune volte molto specifiche [26], altre volte di natura ampia

e interdisciplinare [27]. Nell'ambito accademico legato allo sviluppo di tecnologie per l'informazione e la conoscenza, il termine sembra riferirsi in special modo alla "intelligenza" del sistema, ossia alla capacità di auto configurarsi, auto apprendere e ottimizzarsi per lo svolgimento dello scopo assegnato. Tuttavia, l'innovazione sociale in alcuni settori che caratterizzano il sistema urbano sembra accomunare la maggior parte delle definizioni.

"Someday soon, leaders will combine technological capabilities and social innovation to help produce a smarter world (Moss Kanter and Litow, 2009) [28]".

Uno dei più influenti contributi accademici, che è utilizzato come riferimento culturale in diverse esperienze applicative, è presentato da Rudolf Giffinger (2007) [29]:

"A smart city is a city well performing in a forward-looking way in six characteristics. It is built on the 'smart' combination of endowments and activities of self-decisive, independent and aware citizens."

Nella ricerca condotta presso il Centre of Regional Science della Vienna University of Technology da [29], vengono identificate sei dimensioni (ciascuna delle quali corredata del proprio set di indicatori), che sono utilizzate per definire un *Ranking* tra 70 città europee di medio livello [30], basato sul loro grado di smartness (tabella 2.1): *Smart Economy, Smart Mobility, Smart Governance, Smart Environment, Smart Living, Smart People*. Esistono tuttavia diversi sforzi per la classificazione e la categorizzazione delle SMART City orientate a esplicitare fattori, anche di natura non accademica, che godono di una certa riconoscibilità a livello internazionale o che sono di uso più locale [31]. Ad esempio, ogni anno la *Ernst & Young* produce il rapporto Polis 4.0 [32] in cui classifica le principali città europee rispetto alle componenti SMART, dando forte rilievo alla parte tecnologica del sistema (figura 2.2): applicazioni e servizi, piattaforma di servizi, sensoristica, infrastruttura, cittadini intelligenti, approccio strategico, SMART economy.

Tabella 2.1. Dimensioni della SMART City (elaborazione da Giffinger 2007) [29].

Dimensioni	Fattori
<i>Smart Economy</i>	Definita da 7 fattori: spirito innovativo, imprenditorialità, reputazione economica e brevettualità, produttività, flessibilità del mercato del lavoro, radicamento internazionale, capacità di trasformazione
<i>Smart Mobility</i>	Definita da 4 fattori: accessibilità a livello locale, accessibilità ai livelli nazionale e internazionale, disponibilità di infrastrutture ICT, sistema di trasporti innovativo, sostenibile e sicuro
<i>Smart Governance</i>	Definita da 4 fattori: livello partecipativo del decision-making, servizi sociali e pubblici, trasparenza della governance, strategie politiche e prospettive
<i>Smart Environment</i>	Definito da 4 fattori: attrattività delle risorse naturali, inquinamento, protezione ambientale, gestione sostenibile delle risorse
<i>Smart Living</i>	Definita da 7 fattori: prodotti e opportunità culturali, condizioni di salute, sicurezza individuale, qualità abitativa, opportunità educative, attrattività turistica, coesione sociale
<i>Smart People</i>	Definita da 7 fattori: livello di qualificazione, propensione all'educazione permanente, pluralismo sociale ed etnico, flessibilità, creatività, cosmopolitismo/apertura mentale, partecipazione alla vita pubblica

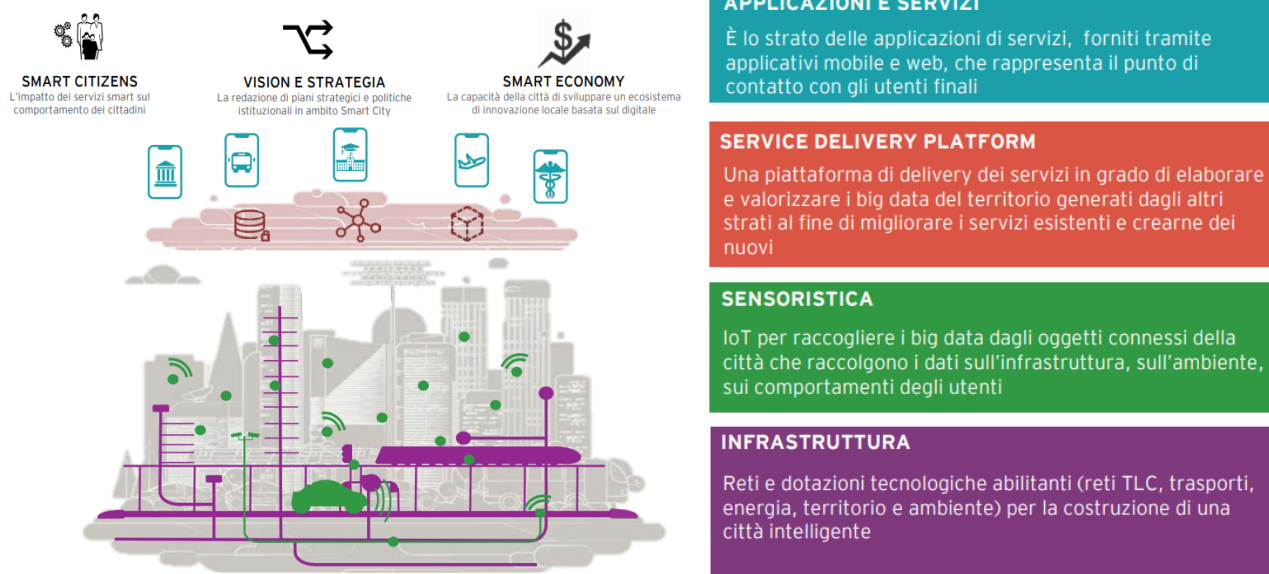


Figura 2.2. Polis 4.0, SMART City Index (EY_SmartCityIndex_2018) [32].

La letteratura legata al mondo economico e industriale, perciò orientata al fare impresa e creare opportunità di investimento, enfatizza “l’intelligenza” legata al potenziale sviluppo di beni e servizi capaci di anticipare e supportare anche l’agire umano. La SMART City è spesso concepita come “il sistema che accomuna i sistemi” creando una rete interconnessa orientata a migliorare i processi che costituiscono la città, e a produrre informazione e dati che alimentano l’innovazione e lo sviluppo di nuove imprese ad alto potenziale economico [33]. Si tratta di un nuovo paradigma di produzione della conoscenza e innovazione che supera quello classico a tre poli, accademia, industria, governo, integrando anche la conoscenza bottom up creata dalla società.

Nelle analisi dei più grandi operatori economici la SMART City è la città dell’impresa e della competitività, perciò l’enfasi è posta sullo sviluppo di nuove tecnologie basate sull’utilizzo di BIG DATA e intelligenza artificiale capaci di moltiplicare l’effetto degli investimenti. Si noti come nella analisi proposta da Frost and Sullivan (2013) [34], le dimensioni della SMART City, pur toccando diversi temi classici, siano da intendersi più come assi di investimento tra le quali si nota l’importanza data alla componente *soft* della SMART City (figura 2.3).

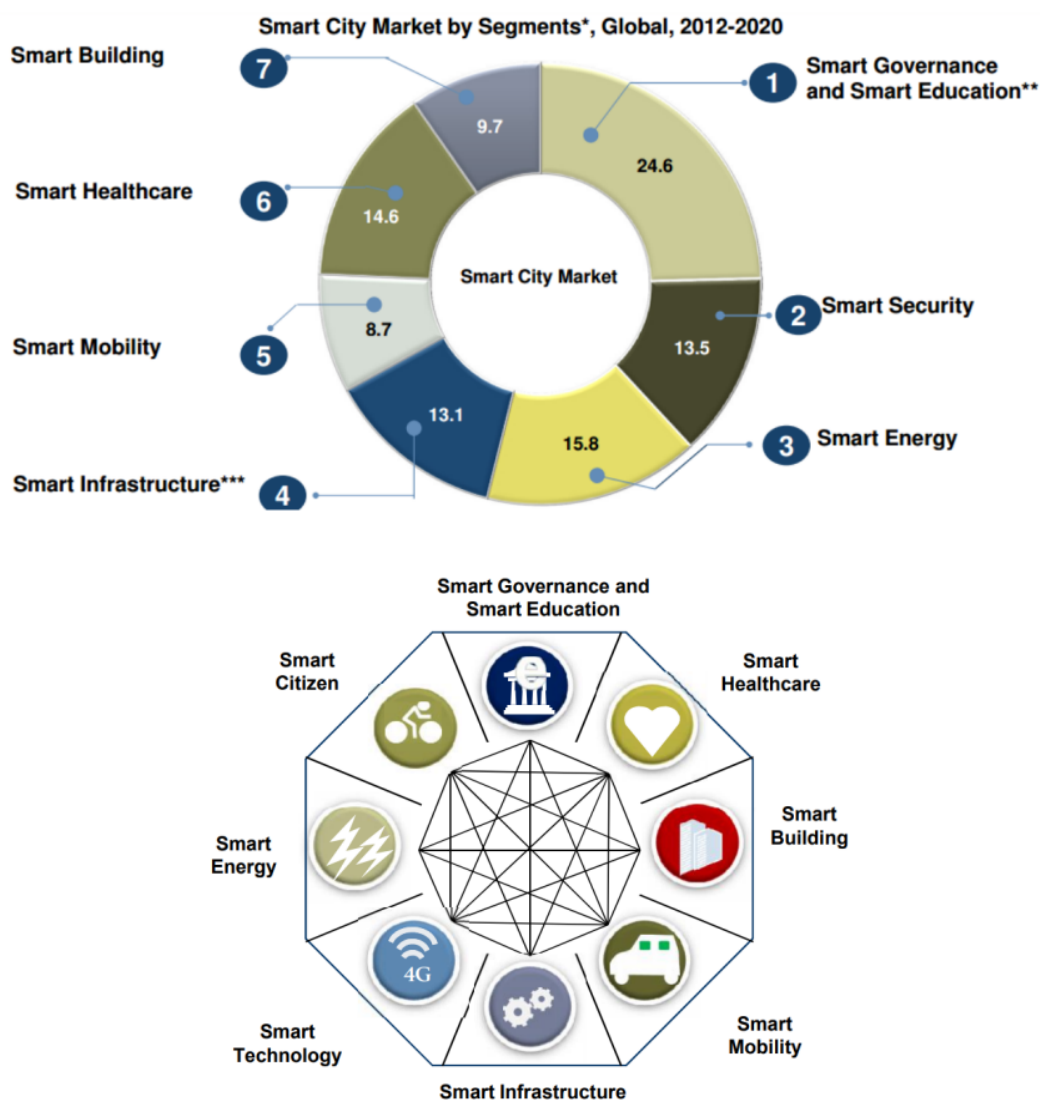


Figura 2.3. “Strategic Opportunity Analysis of the Global Smart City Market” - Frost and Sullivan (2013) [34].

Le interpretazioni governative del concetto di SMART City pongono l’accento sull’intelligenza a supporto dei processi di sviluppo sostenibile, così come generalmente interpretato nelle discipline della pianificazione urbana e territoriale [35]. Le possibilità delle nuove Information Technologies (IT) sono viste come supporto alle tematiche tradizionali dello sviluppo sostenibile urbano e incoraggiano fortemente il coinvolgimento

degli attori locali e della cittadinanza in generale nei processi di trasformazione e sviluppo. La maggiore disponibilità di dati ufficiali dalle reti di sensori urbane, ma anche la maggiore facilità di reperire e analizzare dati di natura bottom up (Voluntary Generated Information – VGI, BIG DATA, sentiment analysis), possono supportare il processo decisionale in maniera più efficace garantendo un approccio condiviso. La visione più conosciuta è quella proposta dalla Commissione Europea (2014) (figura 2.4) attraverso la “Smart City Stakeholder Platform” (SCSP), che ha lo scopo di supportare industria, professionisti e policy maker nella diffusione dell’approccio SMART, tramite l’individuazione dei fattori chiave e della conoscenza più rilevante, facilitando l’incontro con gli investitori [36]. L’obiettivo primario dichiarato è chiaramente l’aumento della qualità della vita dei cittadini, ma comprende anche migliorare la competitività del sistema economico europeo, attraendo investimenti, e attuare la transizione sostenibile dei sistemi urbani tramite il raggiungimento degli obiettivi di riduzione di gas serra. Si riconosce il ruolo centrale delle Information and Communication Technology (ICT) quali strumenti per integrare ed efficientare i processi del sistema urbano e per supportare la creazione della *Community* che leghi cittadini e PA.

Naturalmente le numerose interpretazioni del concetto di SMART City danno origine a una grande varietà di linee guida e protocolli per lo sviluppo o la gestione dei processi di *smartness* urbani sviluppati da diversi soggetti operanti nel territorio [37]. In questo senso il paradigma, che per la sua natura interconnessa guarda al mercato globale e alle reti immateriali di valore, prende una forte connotazione di sviluppo locale bottom up, dove ogni territorio e/o città cerca la propria via “intelligente”, radicata al proprio contesto tenendone in considerazione risorse e peculiarità.

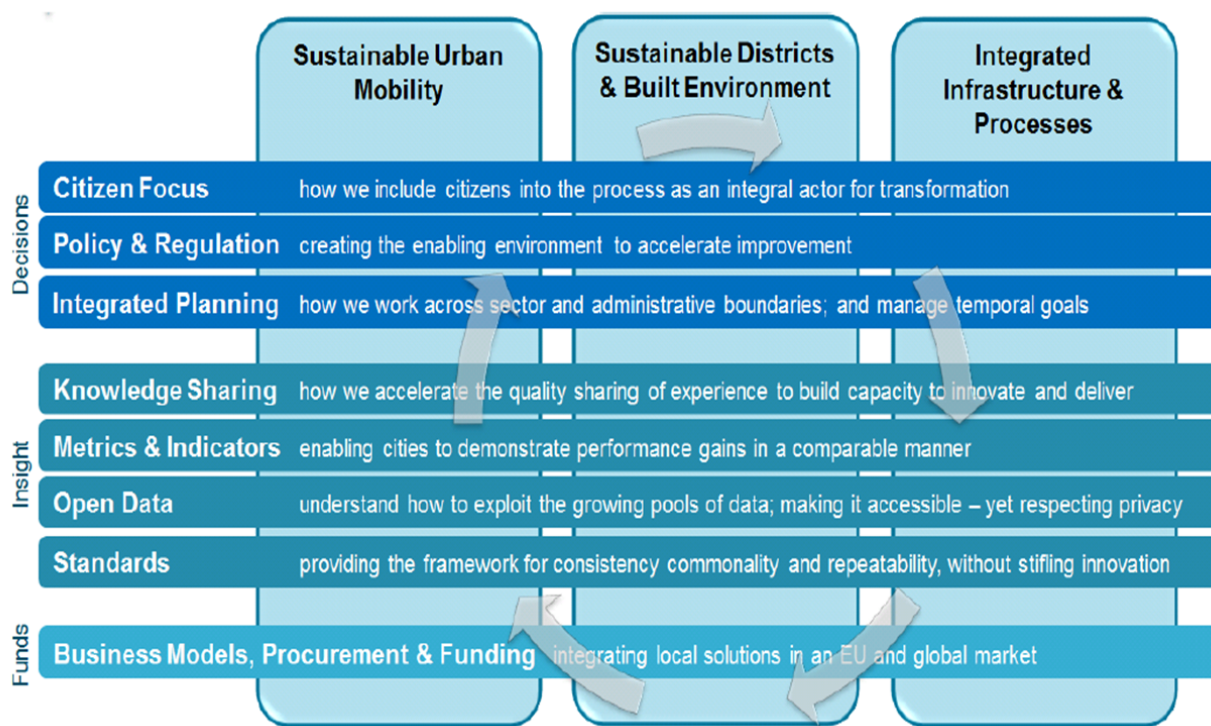


Figura 2.4. Vision della Commissione Europea (tratto da European context [38]).

Tra gli attributi chiave emersi dall’analisi delle differenti definizioni, spicca l’importanza dell’ICT e di infrastrutture e servizi. Questa viene comunemente considerata la parte hard della SMART City, ossia quella caratterizzata da componenti materiali ad alto contenuto tecnologico. Dunque una SMART City sembrerebbe essere in primo luogo una Digital City, infatti le due definizioni hanno sostanzialmente coinciso nella prima parte dello scorso decennio (figura 2.5). Successivamente però, è emersa con forza sempre maggiore la necessità di valorizzare aspetti più soft, quali la Governance tra gli stakeholder di una città, il suo capitale umano e le relazioni sociali all’interno della stessa. Il fine ultimo non è quindi la digitalizzazione e la

conseguente ottimizzazione analitica dei processi che costituiscono il sistema urbano: ciò rappresenta soltanto uno degli strumenti per migliorare la qualità della vita dei cittadini e garantire la crescita economica del territorio, che va però combinato a strategie e sistemi per creare la SMART community o meglio l'utente SMART.



Figura 2.5. Evoluzione concetto di SMART City (Elaborazione da Ambrosetti 2012 [39]).

Sia gli aspetti tangibili (hard) sia quelli intangibili (soft) sono intrinseci nella definizione di SMART City, che, soprattutto nelle sue accezioni governative, sottolinea il ruolo centrale della PA come erogatrice di servizi e come motore di sviluppo economico e sociale grazie a un ruolo sempre più integrato e forte della Governance. La smartness di una AP si può articolare su tre livelli (figura 2.6):

- AP che guida il processo diffondendo esempi virtuosi e promuovendo buone pratiche, ma le azioni sono di iniziativa privata (primo livello);
- AP che promuove politiche e definisce azioni per guidare le iniziative private (secondo livello);
- AP che promuove un approccio integrato e permanente con gli altri attori locali (terzo livello).

SMART è dunque una città che, secondo una visione strategica e in maniera organica, impiega gli strumenti dell'ICT come supporto innovativo negli ambiti di gestione e nell'erogazione di servizi pubblici, grazie anche all'ausilio di partenariati pubblico privati, per migliorare la vivibilità dei propri cittadini; utilizza informazioni provenienti dai vari ambiti in tempo reale, e sfrutta risorse sia tangibili che intangibili; è capace di adattare se stessa ai bisogni degli utenti, promuovendo il proprio sviluppo sostenibile.

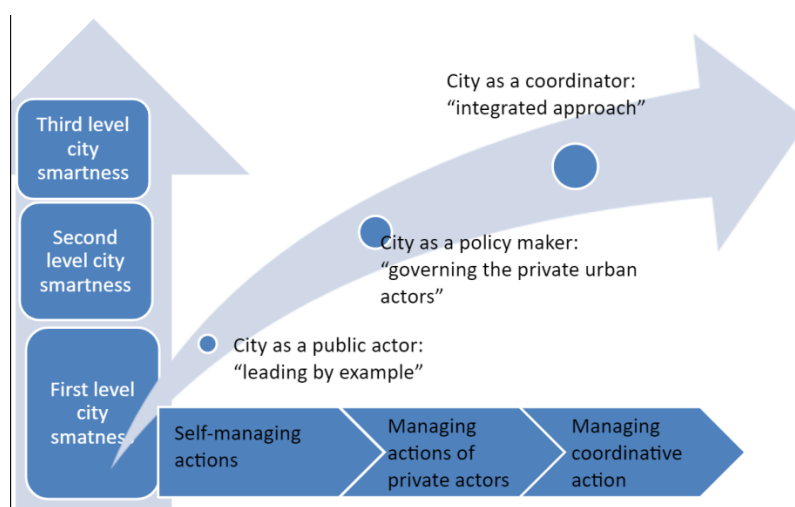


Figura 2.6. Livello di SMART della Governance (tratto da [38]).

2.1.2 La Smart Energy City (SEC)

Il tema energetico è sempre presente negli approcci di SMART City, perché è implicito nella ottimizzazione delle sue principali dimensioni. Per porre l'accento sul tema, alcuni autori propongono la definizione di SMART Energy City (SEC) [40], concepita come sottoinsieme della definizione originaria e come parte della Sustainable City, termine generalmente ritenuto di significato più ampio della città SMART, in quanto porta in primo piano la questione ambientale. Nello specifico alcuni autori [41] ritengono che una SMART Energy City non sia realmente intelligente se non è anche sostenibile, ponendo l'approccio sostenibile come condizione necessaria dell'attribuito SMART (figura 2.7).

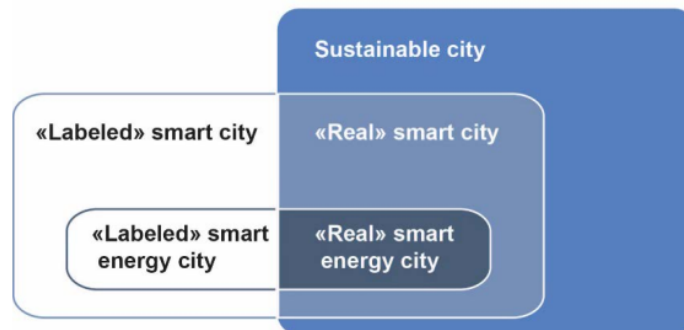


Figura 2.7. Rapporto tra i concetti di Smart Energy City e sostenibilità (tratto da Holland 2008 [41]).

Pur lasciando nello sfondo gli aspetti olistici degli approcci SMART, la SEC si concentra sullo sviluppo di infrastrutture tecnologiche abilitanti (sensori, reti, tecnologie, etc) e di adeguate procedure capaci di limitare le emissioni di CO2 tramite l'efficientamento del sistema e la produzione energetica da fonti rinnovabili (figura 2.8). Le componenti hard del sistema sono quelle direttamente interessate alla produzione, distribuzione, uso e monitoraggio dei vettori energetici ossia: SMART Building, trasporti e mobilità, infrastrutture e reti (elettrica, termica, dati); la componente soft della SEC riguarda l'insieme di servizi, protocolli e conoscenze necessarie a valorizzare le possibilità del sistema nelle sue componenti hard: pianificazione partecipata, gestione e indirizzo degli stili di consumo, gestione e utilizzo delle reti energetiche e informatiche.

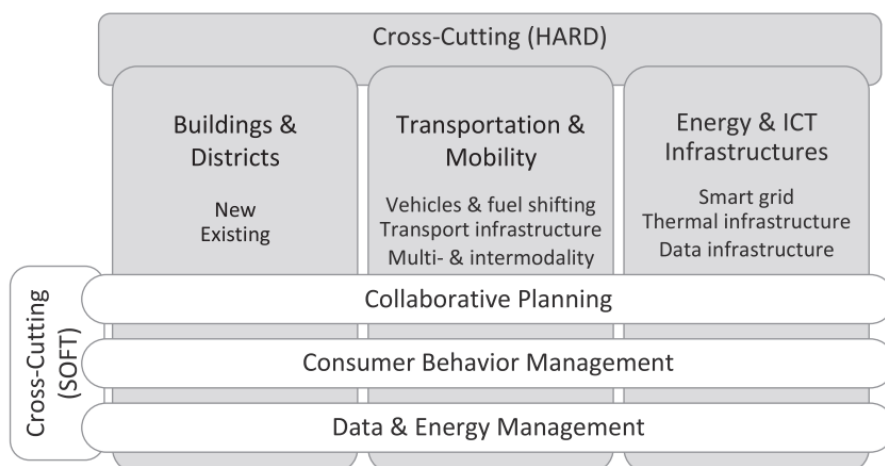


Figura 2.8. Interazione tre elementi hard e soft della SEC (tratto da Mosannenzadeh [42]).

L'impostazione di un processo di pianificazione partecipata permette di integrare anche le istanze di origine bottom up, contribuendo a migliorare l'efficacia dell'azione di Governance. Può influire inoltre in maniera positiva sui comportamenti dei fruitori dei sistemi, in termini di scelta di modalità di trasporto, profilo d'uso degli edifici, presa di coscienza e gestione dei profili di consumo delle reti energetiche, gestione e valorizzazione del flusso informativo dei dati. Lo sviluppo di efficaci algoritmi di trattamento dati e di

interfacce di comunicazione, adeguate agli attori interessati al processo, è uno dei temi centrali della gestione e valorizzazione del dato.

2.1.2.1 La SMART Grid

Prettamente riferito alla componente hard della SEC, anche se comprende nella sua definizione le interfacce gestionali del sistema, la SMART Grid è un concetto attualmente molto usato, che nasce nell'ambito della produzione e distribuzione di energia elettrica che, con l'irrompere delle FER e della micro generazione distribuita, è passato da un approccio centralizzato a uno decentralizzato (figura 2.9). Il sistema elettrico è tradizionalmente concepito come un flusso energetico (e anche informativo) mono direzionale, organizzato per scale gerarchiche, che va dalle grosse centrali fino agli utenti finali. La presenza di sistemi di produzione distribuita, generalmente alimentati da FER, che intervengono a diversi livelli gerarchici della rete, richiede di gestire un flusso informativo ed energetico di natura bidirezionale. Guardando alla micro scala, si diffonde la figura dell'utente finale che si trasforma da solo consumatore a produttore e gestore della propria energia, tramite moderni sistemi di misura e controllo del consumo: il Prosumer può così influire direttamente con le sue scelte nell'equilibrio della rete stessa e nel mercato dell'energia (figura 2.10).

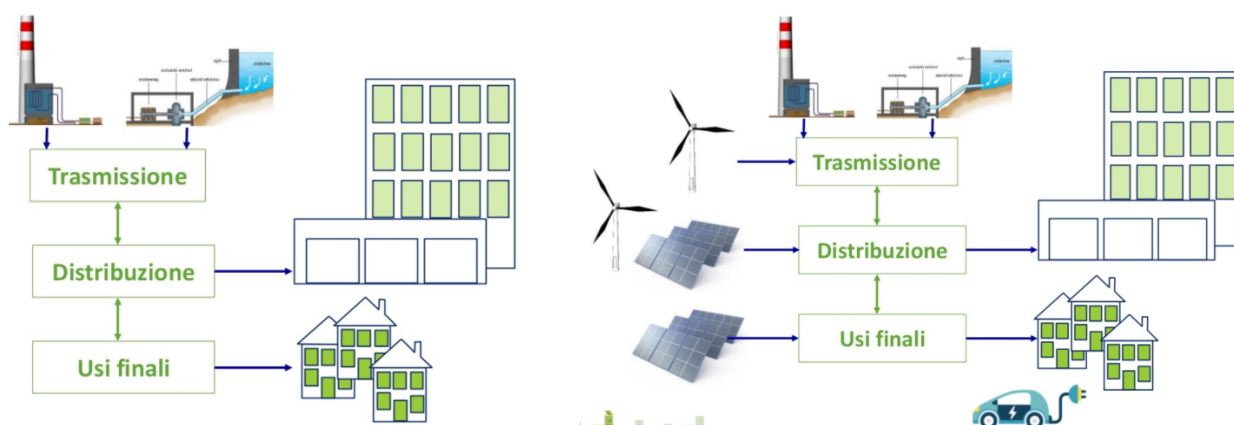


Figura 2.9. Rete elettrica tradizionale centralizzata e rete con generazione distribuita.

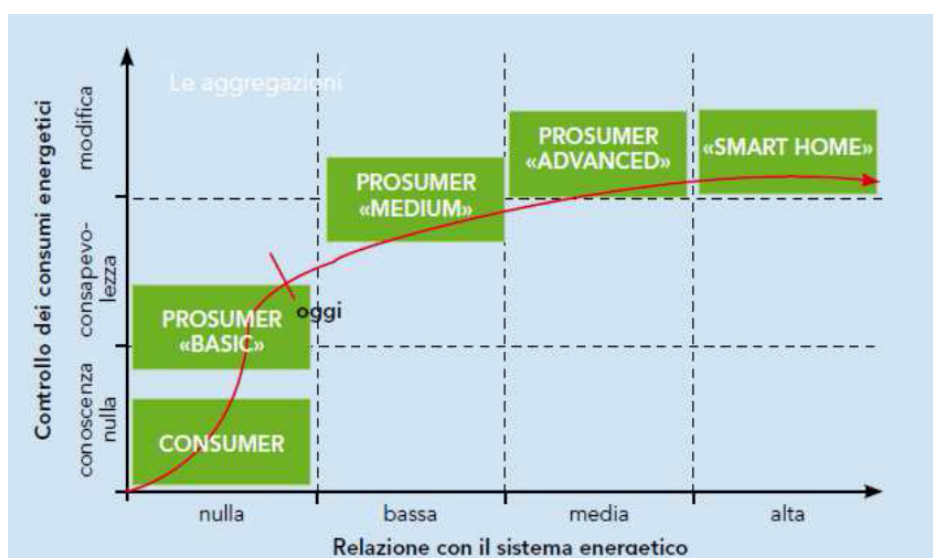


Figura 2.10. Livello di consapevolezza dell'utente del servizio energetico (tratto da [43]).

Si possono ritrovare diverse definizioni di SMART Grid (tabella 2.2): essa può essere descritta come una rete di scambio energetico e informativo trasparente e istantanea a due vie, che permette alle industrie energetiche una migliore gestione del servizio di distribuzione e produzione e consente ai consumatori un

migliore controllo sui propri stili di consumo energetico. Il sistema è perciò “intelligente”, perché, grazie allo scambio reciproco d’informazioni, è possibile migliorare l’efficienza della rete, ridurre i consumi e i costi dell’energia, e massimizzare l’affidabilità e la trasparenza lungo tutta la filiera energetica. L’integrazione con le tecnologie digitali, infatti, rende la rete:

- in grado di rispondere tempestivamente alla richiesta di maggiore o minore consumo di uno o più utenti (gestione dei picchi di domanda);
- resiliente alla variabilità del carico di energia elettrica prodotta in centrali che sfruttano energie rinnovabili con caratteristiche di aleatorietà, quali eolico e fotovoltaico;
- facilmente integrabile alle centrali elettriche di produzione tradizionali a servizio del bilanciamento energetico della rete di distribuzione nazionale.

Tabella 2.2. Alcune definizioni di SMART Grid.

<i>“A Smart Grid is an electricity network that can intelligently integrate the actions of all users connected to it-generators, consumers and those that do both-in order to efficiently deliver sustainable, economic and secure electricity supplies.”</i>	European technology platform
<i>“A Smart Grid uses digital technology to improve reliability, security and efficiency (both economic and energy) of the electrical system from large generation, through the delivery systems to electricity consumers and a growing number of distributed-generation and storage resources.”</i>	U.S. department of energy
<i>“The smart grid is a revolutionary undertaking-entailing new communications-and control capabilities, energy sources, generation models and adherence to cross jurisdictional regulatory structures.”</i>	IEEE definition for Smart Grid

Senza entrare nel dettaglio dei componenti e delle funzioni di una SMART Grid, per i quali si rimanda alla ampia letteratura disponibile [44] [45], gli elementi principali che la caratterizzano possono essere così schematizzati (figura 2.11):

- Tecnologie per la produzione di energia prevalentemente da FER, per dare sicurezza al sistema, migliorarne l’efficienza, diminuire i costi e limitare il ricorso a fonti non rinnovabili;
- Infrastruttura di monitoraggio e controllo della rete di distribuzione nei suoi diversi livelli gerarchici, per migliorare la comunicazione bidirezionale tra gli elementi della SMART Grid locale e la rete tradizionale;
- Strategie di gestione della domanda e di sistemi di accumulo a supporto della componente elettrica o anche termica della rete, al fine di equilibrare i picchi di produzione e consumo locale;
- Integrazione dei veicoli elettrici che possono avere un effetto simile all’accumulo elettrico sulla gestione della rete, e contribuire alla diminuzione delle emissioni di CO2 locali;
- Energy Management System (EMS) per gli edifici e per i servizi urbani locali che utilizzano protocolli intelligenti di ottimizzazione interna basati su appropriate infrastrutture energetiche e sensoristiche;
- Sistema di raccolta e gestione degli elementi della rete (Virtual Power Plant – VPP), orientato a ottimizzarne l’utilizzo sulla base dei dati forniti dai sensori anche con metodologie predittive, comunicare con la rete sovrallocale e svolgere funzione di *hub* per il mercato energetico elettrico.

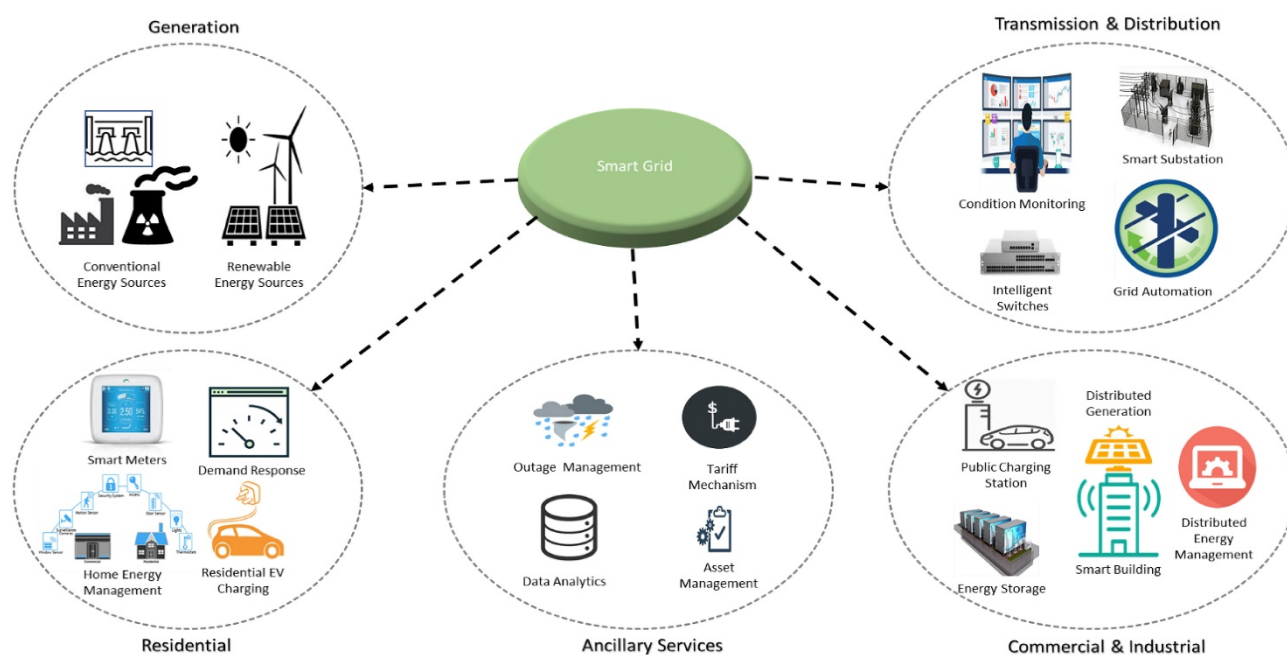


Figura 2.11. Schema della SMART Grid (tratto da [45]).

2.1.2.2 Il ruolo del patrimonio edilizio nella SMART City

Il patrimonio edificato, o meglio “l’edificio”, con i suoi diversi usi, svolge un ruolo centrale nella SMART City in quanto non solo è responsabile di una rilevante quota dei consumi e delle emissioni del sistema, ma è la parte più visibile della infrastruttura fisica della città e si costituisce come il luogo dove avviene la principale interfaccia tra la componente umana e l’infrastruttura sensibile della città.

Come già accennato, gli edifici sono responsabili di una cospicua parte delle emissioni del sistema urbano, essi nel loro insieme costituiscono il paesaggio e l’ambiente urbano che ospita le attività dei fruitori della città. Intervenire sulla parte esterna degli edifici, tramite la tutela e la valorizzazione degli edifici storici e il recupero delle situazioni di degrado, migliora la vivibilità e l’attrattività della città, ma tramite l’adozione di un progetto bioclimatico, può contribuire anche alla diminuzione degli effetti dell’isola del calore e delle emissioni di polveri sottili.

È dentro gli edifici che si svolge la maggior parte della vita dei cittadini, perciò essi sono il principale fattore che influisce sulla qualità della vita della città. La città intelligente deve individuare efficaci programmi di miglioramento del patrimonio edilizio, individuando le criticità e le opportunità presenti e definendo delle priorità. L’efficientamento energetico può essere un efficace volano economico per promuovere un approccio olistico al recupero edilizio, che ponga al centro dell’intervento le esigenze degli occupanti tramite azioni di miglioramento di comfort climatico interno, salubrità, accessibilità.

L’edificio, con i suoi sistemi di gestione energetica (EMS), svolge un ruolo chiave nella SMART Grid, effettua una prima gestione della domanda energetica ottimizzando i sistemi, quali micro generazione da FER, accumuli, regolazione impianti, con le esigenze specifiche degli occupanti, ed è anche l’interfaccia con la comunità energetica locale, nella quale l’utente finale svolge il ruolo attivo del Prosumer immettendo e richiedendo energia e informazioni.

Tuttavia il recupero e il miglioramento dell’efficienza energetica del patrimonio edilizio è un processo tutt’altro che facile, anche se sono sempre più diffusi esempi di nuovi edifici, o nuove urbanizzazioni, altamente efficienti, che utilizzano massicciamente le nuove tecnologie informatiche. A oggi, la maggior parte del patrimonio edilizio resta caratterizzato da scarse performance energetiche e carente dotazione tecnologica per i servizi ICT avanzati.

La Governance della PA gioca perciò un ruolo centrale in quanto deve favorire il processo, definendo obiettivi strategici e priorità per il patrimonio edilizio che gestisce direttamente, e promuovere politiche e incentivi per quello privato tramite un approccio multi settoriale integrato, che consideri tutte le dimensioni del sistema urbano. Lo sviluppo di strumenti e metodologie per regolare l’attività edificatoria e incentivare le buone pratiche, che integrano l’efficientamento energetico al miglioramento della qualità architettonica edifici, è perciò un fattore cruciale della SMART City.

Il coinvolgimento attivo della cittadinanza e degli altri attori forti del processo è l’elemento chiave che determina il successo e l’efficacia di un’azione di Governance: non si tratta solo di comunicare o interpellare la cittadinanza per uno specifico progetto o azione di governo, ma di progettare e attuare un processo di comunicazione bidirezionale continuo, volto ad aumentare la consapevolezza nelle scelte quotidiane e alla partecipazione attiva. Il coinvolgimento del singolo cittadino è centrale, esso è fruitore dei servizi energetici in quanto occupante, decisore in quanto proprietario dell’edificio e principale finanziatore del processo di efficientamento e recupero del patrimonio. Le ITC svolgono ovviamente un ruolo chiave in questo aspetto, essendo pervasive nella diffusione ed efficaci nella comunicazione.

Come già accennato, l’efficientamento energetico del patrimonio edilizio, può essere un potente volano economico per grossi piani di intervento di iniziativa pubblico privata, ma può dare anche nuovo impulso al mercato delle piccole ristrutturazioni del patrimonio privato più legato a imprese di piccola dimensione e ad artigiani locali. L’effetto della riqualificazione del patrimonio edilizio migliora anche l’ambiente nel suo complesso, rendendolo più appetibile per investimenti nel campo del turismo e del marketing urbano e territoriale.

2.1.2.3 Lo SMART Building

L’innovazione legata all’introduzione negli edifici dei sistemi e dispositivi BEMS (Building Energy Management System) e BACS (Building Automation and Control System) consente un miglioramento della loro gestione,

individuando puntualmente le inefficienze esistenti. Essi sono, inoltre, in grado di rendere disponibile una grandissima quantità di dati sui consumi, le condizioni ambientali interne ed esterne ed i profili di utilizzo che possono supportare la pianificazione di interventi di riqualificazione energetica. In altri termini, i BEMS e i BACS supportano la fase conoscitiva preliminare agli interventi di riqualificazione, definita "diagnosi energetica" e il monitoraggio ex-ante ed ex-post dell'edificio consente di definire dove l'intervento è maggiormente opportuno e di verificarne l'efficacia. D'altro canto, gli attuali sviluppi in tema di digitalizzazione delle informazioni del processo edilizio, che stanno portando a una diffusione di metodologie e strumenti di BIM, introducono il concetto per cui questi possano fornire un ambiente di immagazzinamento, elaborazione e rappresentazione dei dati acquisiti dai sistemi sopra richiamati. La possibilità di interfaccia con un sistema BIM consente una maggiore correlazione con altre informazioni sull'edificio, come le tipologie costruttive, le modalità di gestione e manutenzione o la presenza di degrado, facilitando una pianificazione degli interventi più efficiente e completa. L'edificio "intelligente" della SMART City è perciò caratterizzato dai seguenti elementi:

- Approccio sostenibile e centrato sui fattori umani alla progettazione e alla realizzazione degli interventi edilizi;
- Alta efficienza del sistema edificio – impianto e attenzione al ciclo di vita dei materiali;
- Presenza di sistemi di micro generazione da FER;
- Integrazione con sistemi di SMART Home e IOT volti al supporto delle funzioni svolte nell'edificio;
- Integrazione dello SMART Building nella SMART Grid tramite i sistemi di gestione energetica dell'edificio;
- Presenza di sistemi di automazione e controllo e SMART metering;
- Utente consapevole della gestione dell'edificio.

La SMART Home si riferisce a un insieme di sensoristica e di procedure avanzate a supporto delle funzioni e delle attività svolte nella unità immobiliare (figura 2.12): si tratta di infrastrutture tecnologiche generalmente realizzabili con costi contenuti e a ridotta invasività, che le rendono alla portata degli interventi domestici.

Lo SMART Building si riferisce principalmente a un insieme di sensoristica e di procedure avanzate a supporto della gestione della componente energetica dell'edificio. Si tratta di edifici ad alta efficienza, che possono utilizzare una combinazione di sistemi e materiali innovativi, impianti alimentati a energia rinnovabile, accumuli energetici e sistemi di automazione e di monitoraggio, volti a minimizzare il consumo energetico e a gestire il rapporto tra l'edificio e la rete. Questi sistemi sono generalmente composti da un sensore che monitora le condizioni dell'ambiente, da un sistema che interpreta il risultato secondo appropriati algoritmi e adatta, in maniera automatica, il funzionamento dell'impianto a esso associato.

Oltre alla dotazione di sensori e procedure avanzate per la gestione dei dati, le caratteristiche fondamentali dell'edificio intelligente sono la sua efficienza energetica e la qualità degli ambienti interni, come proposti dal paradigma del nZEB. La promozione del recupero del patrimonio edilizio pubblico come esempio di nZEB locali è una delle strategie chiave per guidare la diffusione anche nel settore privato delle buone pratiche e delle tecnologie. Gli attuali approcci promuovono l'utilizzo di biomateriali e tecnologie a basso impatto ponendo l'accento sull'approccio olistico all'efficientamento energetico, che consideri il progetto in rapporto alle caratteristiche dell'edificio e del suo contesto di relazione.



Energia e sistemi HVAC

- Presenza, programmazione
- Manutenzione impianti (programmata, per emergenza, ..)
- Monitoraggio comfort interno ed adattamento dinamico (temperature, aria, finestre,..)
- Monitoraggio dei consumi 24/24h ed ottimizzazione impianto Previsione dei carichi termici
- Interfacce di comunicazione

Figura 2.12. Alcune funzioni dei sensori per gli SMART building.

2.1.2.4 Sistemi di controllo e SMART Meter

Come accennato, i sistemi di sensori e attuatori sono uno degli elementi centrali della “intelligenza” dell’edificio e, in senso più lato, della città. La Direttiva UE 2018/844, che integra e sostituisce la direttiva EPBD precedenti (*Energy Performance Building Directive* - 2010/31, Dir. 2012/27/UE sull’efficienza energetica), oltre a ribadire l’obbligo e la necessità di definire strategie nazionale per l’efficientamento energetico del parco edilizio nuovo ed esistente, pone l’accento sulla centralità dei sistemi intelligenti in tale processo. Nello specifico si richiede l’installazione di BACS non solo nelle nuove costruzioni, ma anche in quelli già esistenti, settando al 2025 l’obbligo di tali sistemi negli edifici non residenziali (oltre 290 kW di potenza per riscaldamento e/o ventilazione). Inoltre prevede l’introduzione di un sistema comune europeo facoltativo, denominato Smart Readiness Indicator (SRI), con il compito di indicare la “predisposizione all’intelligenza” degli edifici, ossia valutare la capacità degli edifici di impiegare le nuove tecnologie per adattarsi alle esigenze dell’occupante, interagire con la rete energetica e ottimizzare il funzionamento e la manutenzione. La norma EN 15232 (2015) riguarda l’automazione rivolta al risparmio energetico negli edifici e ne definisce le caratteristiche, prevedendo un metodo per individuare e valutare i requisiti minimi di automazione e gestione degli immobili. Essa definisce due tipi di sistemi che possono riguardare diverse funzioni dell’edificio:

- BACS, che comprendono ogni prodotto o software in grado di automatizzare un adattamento del sistema rispetto a una variabile misurata;
- Technical Home and Building Management (TBM): strumenti BACS più evoluti orientati alla gestione tecnica dell’edificio.

La norma prevede quattro classi di automazione che sono prescritti in maniere differenti in funzione del tipo unità immobiliare valutata:

- Classe D: comprende gli impianti tecnici tradizionali e privi di automazione e controllo, non efficienti dal punto di vista energetico.
- Classe C - STANDARD (riferimento): corrisponde agli impianti dotati di sistemi BACS tradizionali (es: valvole termostatiche per ogni ambiente, sonde climatiche, sensori di presenza per le luci, etc).

- Classe B - ADVANCED: corrisponde agli impianti dotati di sistema (BACS) avanzato e dotati anche di alcune funzioni di gestione degli impianti tecnici di edificio (TBM) specifiche per una conduzione centralizzata e coordinata dei singoli impianti.
- Classe A -HIGH ENERGY PERFORMANCE: corrisponde a sistemi BACS e TBM con livelli di precisione e completezza del controllo automatico tali da garantire elevate prestazioni energetiche all'impianto: *"I dispositivi di controllo delle stanze devono essere in grado di gestire impianti HVAC tenendo conto di diversi fattori (ad esempio, valori prestabiliti basati sulla rilevazione dell'occupazione, sulla qualità dell'aria ecc.) ed includere funzioni aggiuntive integrate con altri servizi dell'edificio (ad esempio, elettricità, illuminazione, schermatura solare ecc.)"*.

Lo SMART Meter è un contatore di consumo energetico ritenuto "intelligente" in quanto dotato di interfacce utente particolarmente evolute in termini di rappresentazione e comunicazione dei valori registrati istantanei e storici. Inoltre può essere collegato con un aggregatore locale di informazioni (VPP) e contribuire a fornire i dati per la gestione ottimizzata dei profili di domanda specifici della comunità energetica anche a livello urbano (figura 2.13).

Diversi autori hanno dimostrato che la consapevolezza dei propri consumi e delle attività che li hanno generati può determinare un adattamento delle abitudini dell'utente, che conduce a un risparmio energetico che in taluni casi può essere rilevante [46]. La sfida di questi strumenti è lo sviluppo di adeguate interfacce di dialogo, che favoriscano il comportamento adattivo degli utenti. In letteratura sono state evidenziate le componenti principali da tenere in considerazione per disegnare le interfacce: serie storica dei consumi, confronto con i consumi standard, articolazione dei consumi nelle diverse attività a cui sono associati, incentivi [47] e sistemi di premi e penalità [48]. Di seguito alcune caratteristiche [49]

1. serie storica dei consumi: permette agli utenti di osservare il consumo attuale e di confrontarlo con quello relativo a differenti periodi temporali, sviluppando la riflessione sui comportamenti a cui possono essere associate differenze positive o negative nei consumi;
2. confronto tra consumi e fabbisogno standard: contestualizza i risultati espressi dai consumi attuali e storici all'interno di un quadro di fabbisogno e comportamenti standard o di riferimento, stimolando l'utente a uniformare i propri consumi con quelli di utenze simili;
3. articolazione dei consumi nelle diverse attività a cui sono associati: consente la lettura dei consumi aggregati secondo le attività a cui sono associati. Tale componente aumenta le possibilità degli utenti di effettuare scelte informate, relazionando in maniera specifica i comportamenti con i consumi;
4. incentivi: sono un sistema collaterale a quello dei premi e della penalità, e si basano sull'incentivazione all'accumulo di premi o crediti affinché si realizzino condizioni vantaggiose per l'utente oppure si possono attivare tecniche di gioco;
5. sistemi di premi e penalità: offrono la possibilità di acquisire o perdere "crediti" qualora siano attuati comportamenti di risparmio o, al contrario, di spreco energetico; l'uso di questa componente è associata al problema del picco dei consumi.

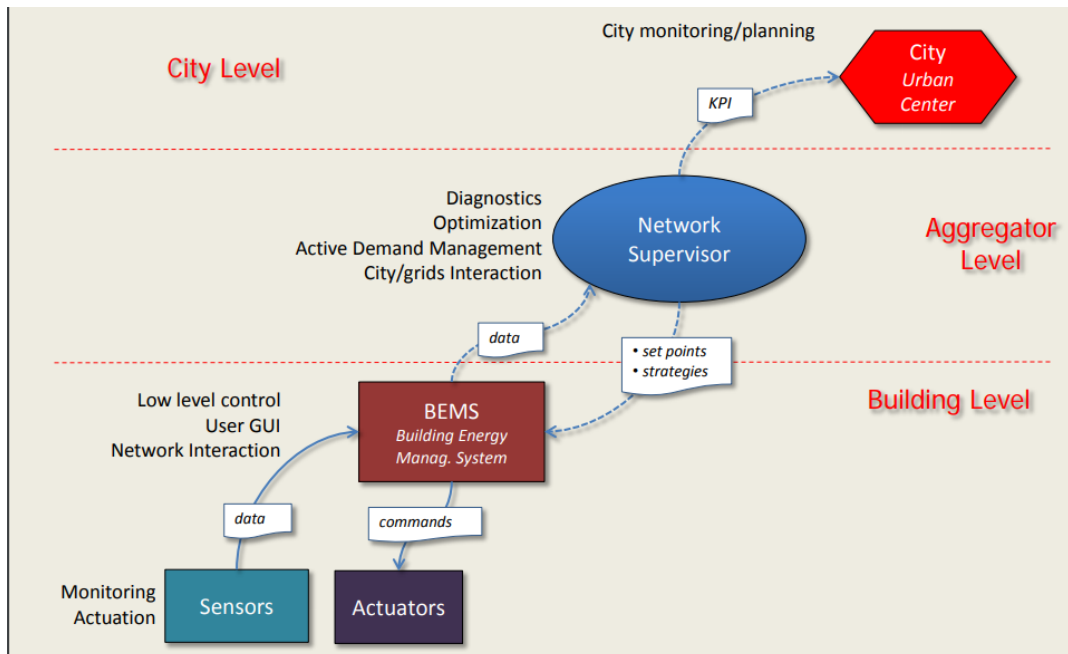


Figura 2.13. Rapporto tra sensori dello SMART Building e SMART City (tratto da [50]).

2.1.3 SMART City nel quadro Europeo

Il quadro normativo europeo di sfondo si riferisce principalmente al pacchetto energia e clima della UE (Clean Energy for all Europeans Package [51]), che setta ambiziosi traguardi in termini di riduzione di emissioni gas serra, aumento della copertura del fabbisogno energetico da fonti rinnovabili ed efficientamento energetico su alcuni orizzonti temporali (2020, 2030, 2050). Gli obiettivi tra il 2020 ed il 2050 prevedono la riduzione dei gas serra dal 20% (previsto per il 2020) al 80-95% (2050) rispetto ai livelli del 1990, l'aumento del ricorso alle FER per la copertura del fabbisogno energetico dal 20% al 85-95% e l'efficientamento energetico dal 20% al 85-95%. Tali obiettivi complessivi per l'UE sono settati nuovamente poi per ogni stato in funzione delle caratteristiche specifiche del sistema energetico e della solidità del sistema economico. Considerando ormai passati e in gran parte soddisfatti gli obiettivi per il 2020, il prossimo traguardo è posto al 2030 secondo gli indirizzi strategici della Unione per l'Energia che prevedono cinque campi di intervento:

- miglioramento della efficienza energetica, con focus speciale per il patrimonio edilizio;
- aumento della quota di fonti rinnovabili;
- diminuzione delle emissioni di gas serra;
- potenziamento della Governance;
- progettazione del mercato elettrico.

Il Ministero dello Sviluppo Economico italiano (MiSE) ha formulato la proposta di Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) [52], volta a garantire il raggiungimento degli obiettivi energetici e climatici dell'UE per il 2030 (figura 2.14). Il PNIEC prevede al 2030 una copertura del 30% dei consumi finali lordi di energia garantito da fonti rinnovabili, in linea con l'obiettivo europeo, ottenuta tramite una copertura del 55,4% nel settore elettrico, al 33% per gli usi di riscaldamento e raffrescamento (prevede un miglioramento del 1,3% annuo) e al 21,6% nel settore trasporti (maggiore di quello europeo, pari al 14%). Il miglioramento della efficienza energetica riporta una riduzione dei consumi di Energia Primaria (EP) del 43% rispetto allo scenario PRIMES 2007 [53] (superiore al 32,5% della UE). Infine la riduzione dei gas serra prevista rispetto ai livelli del 2005 è del 33% (superiore al 30% UE), che comprende anche i settori che non rientrano nell'Emission Trading System (ETS) [54], ossia l'industria non energivora: trasporti (non aviazione), il settore residenziale, il terziario, l'agricoltura e i rifiuti.

Il PNIEC non setta obiettivi cogenti di riduzione di gas serra per i settori ETS e non individua valori obiettivo di riduzione di emissioni complessive calcolati rispetto al 1990.

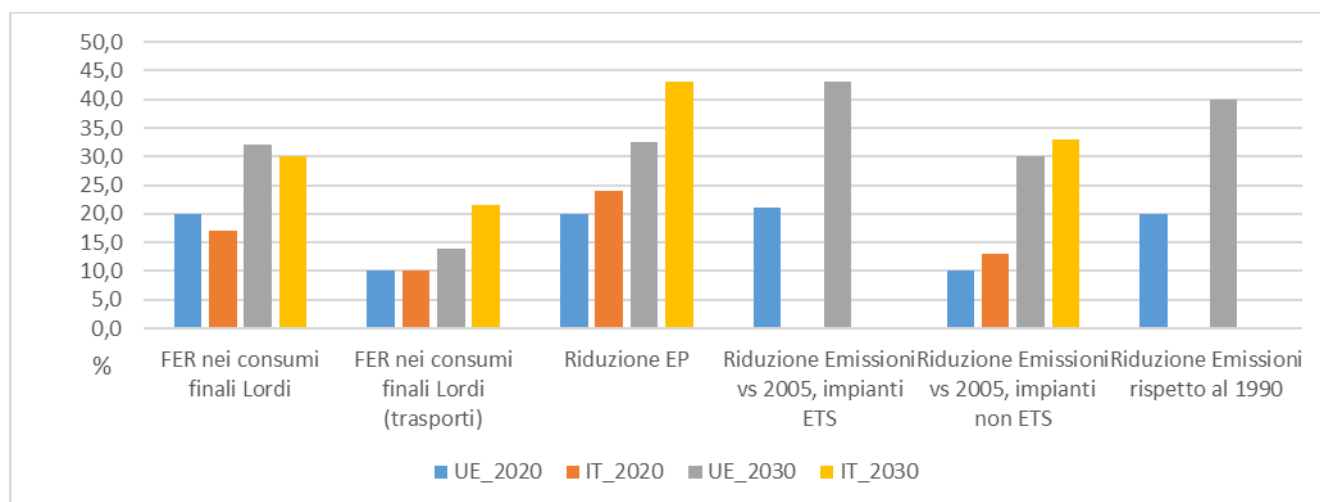


Figura 2.14. Obiettivi Italiani e UE a confronto (elaborazione dell'autore dal PNIEC) [52].

Per superare le forti barriere ancora presenti allo sviluppo della diffusione delle tecnologie basate sulle fonti rinnovabili e superare l'inerzia all'efficientamento energetico del parco edilizio e del sistema urbano nel suo complesso, la Comunità Europea adotta un articolato sistema di promozione e finanziamento che si incentra nel SET- Plan (lanciato nel 2009-10) [55], che rappresenta il principale sistema di supporto alla decisione per

la politica energetica europea. Lo scopo è da una parte promuovere con finanziamenti mirati lo sviluppo di tecnologie low carbon e supportare il trasferimento tecnologico (European Technology Platforms) [56], dall'altra promuovere la definizione e la sperimentazione sul campo di metodologie e strumenti di supporto alla Governance multilivello, che favoriscano il coinvolgimento degli attori del processo di trasformazione urbana.

Il SET-Plan propone un approccio olistico, che integra lo sviluppo e la selezione delle tecnologie low carbon più appropriate rispetto al contesto, con l'applicazione di azioni di policy, volte alla loro penetrazione e sviluppo nel mercato (figura 2.15). Nell'ambito del SET-Plan si è formato il consorzio European Energy Research Alliance (EERA), che ha lo scopo di accelerare lo sviluppo delle nuove tecnologie per l'energia, attraverso la creazione e l'implementazione di Joint Research Programmes [57], che comprende il Joint Programme Smart Cities (2012), articolato in quattro aree di lavoro: Energy in Cities (coordinato da AIT, Austria); Urban Energy Networks (coordinato da ENEA, Italia); Interactive Buildings (coordinato da SINTEF, Norvegia); Urban City Related Supply Technologies (coordinato da TNO, Olanda). Nel 2012 è stata lanciata anche la Smart City Stakeholders Platform [58], ora evoluta nella European Innovation Partnership Smart Cities, che riunisce i principali attori industriali e di ricerca, al fine di aggregare intorno a tematiche condivise le richieste di finanziamento verso la Comunità Europea. *Smart Cities & Communities* è stato anche uno dei temi proposti dal Programma Quadro dell'Unione Europea per la ricerca e l'innovazione relativo al periodo 2014-2020 "Horizon 2020", che ha finanziato diversi progetti di ricerca a riguardo [59]. In occasione della COP21 di Parigi è stata siglato l'*Accordo Mission Innovation*, a cui hanno aderito 22 paesi e la Commissione UE, impegnandosi a raddoppiare entro 5 anni gli investimenti nelle attività di R&S su tecnologie low carbon. L'Italia con Ministeri (MiSE, MAECI, MATTM, MIUR, MEF) ed Enti pubblici di ricerca (ENEA, CNR, RSE, OGS, IIT) guida una delle priorità del programma relativa alla Smart Grid Innovation Challenge [60].

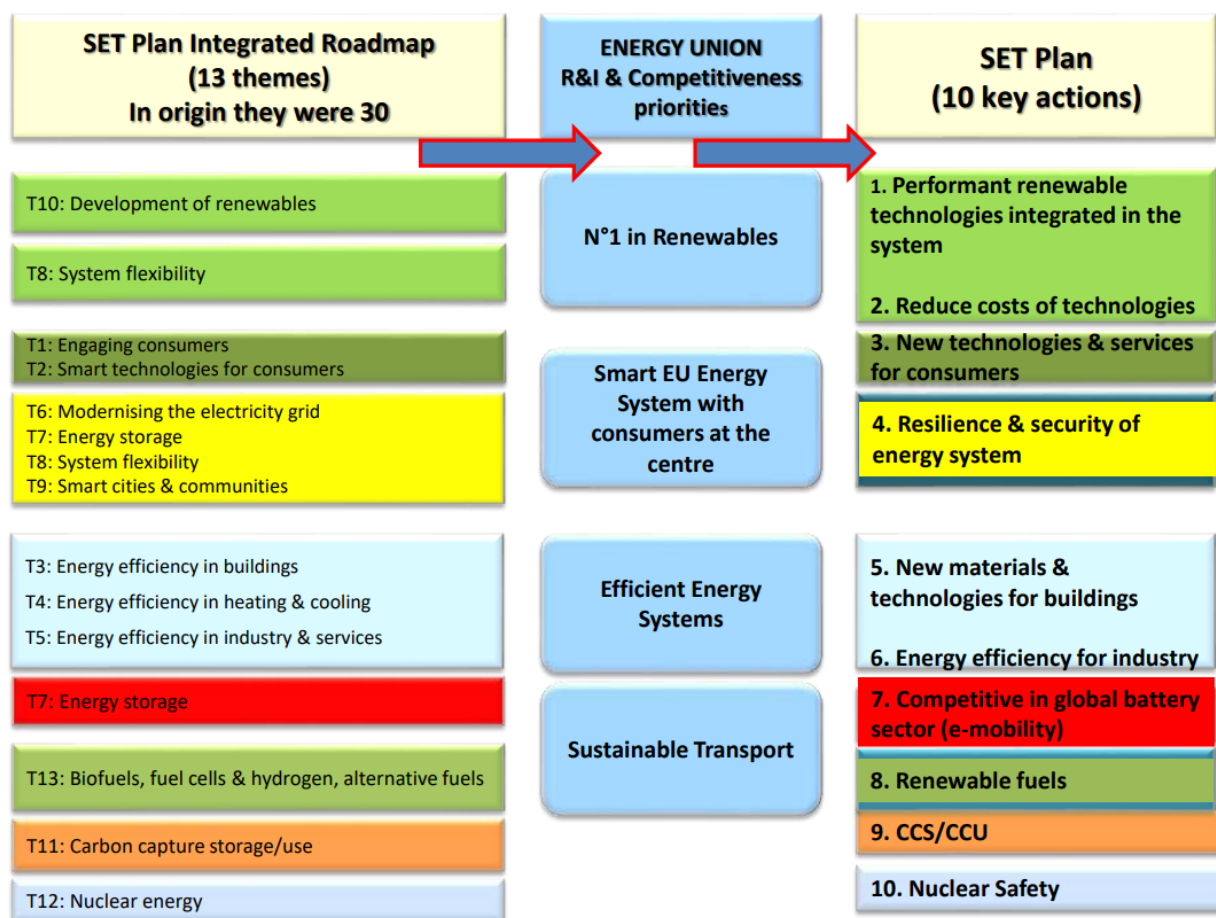


Figura 2.15. Integrazione tra priorità di ricerca nella CE, Tratta da Steering Group SET Plan (2015).

Uno degli aspetti cardine della strategia UE è perciò il supporto alla creazione degli elementi *soft* della città intelligente, cioè la SMART Community, che pone una forte enfasi sullo sviluppo di visioni strategiche condivise dagli attori di un processo di trasformazione sostenibile dell'ambiente urbano.

Il Patto dei Sindaci è uno dei principali strumenti del SET- Plan per la creazione della SMART Community che ha avuto una ampia diffusione in ambito europeo e soprattutto in Italia (figura 2.16). Nel Patto dei Sindaci l'amministrazione locale è promotrice e gestore del processo di trasformazione urbana, ma il ruolo chiave è giocato dalla cittadinanza, che ricopre il duplice ruolo di essere depositaria della conoscenza riguardo alle caratteristiche del sistema, preziose per la definizione e valutazione delle azioni del programma, e principale destinataria della politica, in quanto proprietaria degli edifici e utente dei servizi energetici.

Il Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile (PAES), il sempre più diffuso strumento operativo di natura volontaria del Patto dei Sindaci, stimola amministratori e cittadini alla ricerca di modelli di gestione e sviluppo energeticamente più efficienti e sostenibili. Essenzialmente i PAES sono strutturati in due parti (figura 2.17): la parte di analisi, che comprende il censimento e la stima delle emissioni di gas serra della municipalità e dei fattori locali che le condizionano (definita *Baseline Emissions Inventory - BEI*), e la parte propositiva, che definisce le azioni e le misure del piano e ne stima gli effetti rispetto allo scenario base definito in precedenza. Il BEI esprime il totale delle emissioni di CO₂ in tonnellate per anno riferibili agli usi finali dei diversi vettori energetici sui quali l'amministrazione può influire direttamente o indirettamente tramite azioni di controllo, indirizzo e incentivazione. Gli usi finali energetici presi in considerazione riguardano il settore residenziale e commerciale e comprendono anche quelli relativi alla gestione delle acque e dei rifiuti, i trasporti, l'illuminazione pubblica e il settore produttivo industriale. Il PAES spinge a individuare degli obiettivi specifici, misurabili, raggiungibili e gradualmente tramite un processo di gestione virtuosa delle risorse un approccio partecipativo continuo.

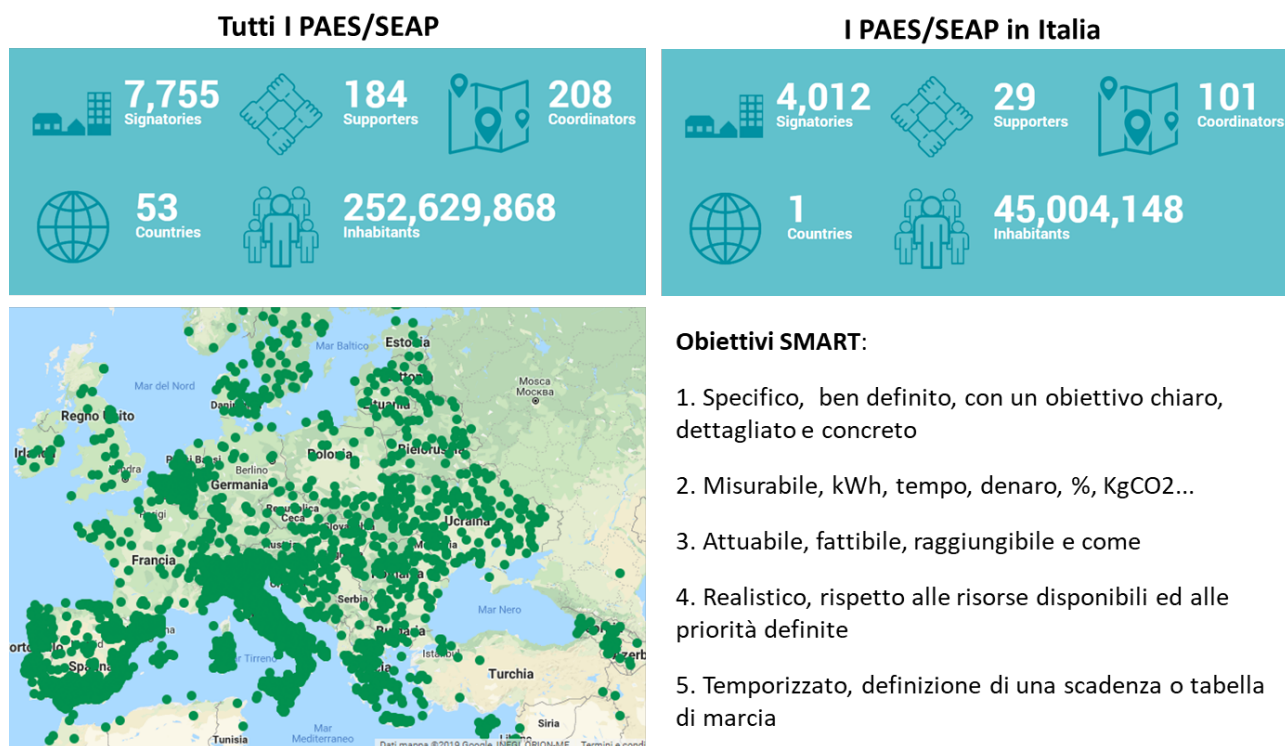


Figura 2.16. Numeri dei PAES, accesso al portale del patto dei sindaci di marzo 2019 [61].

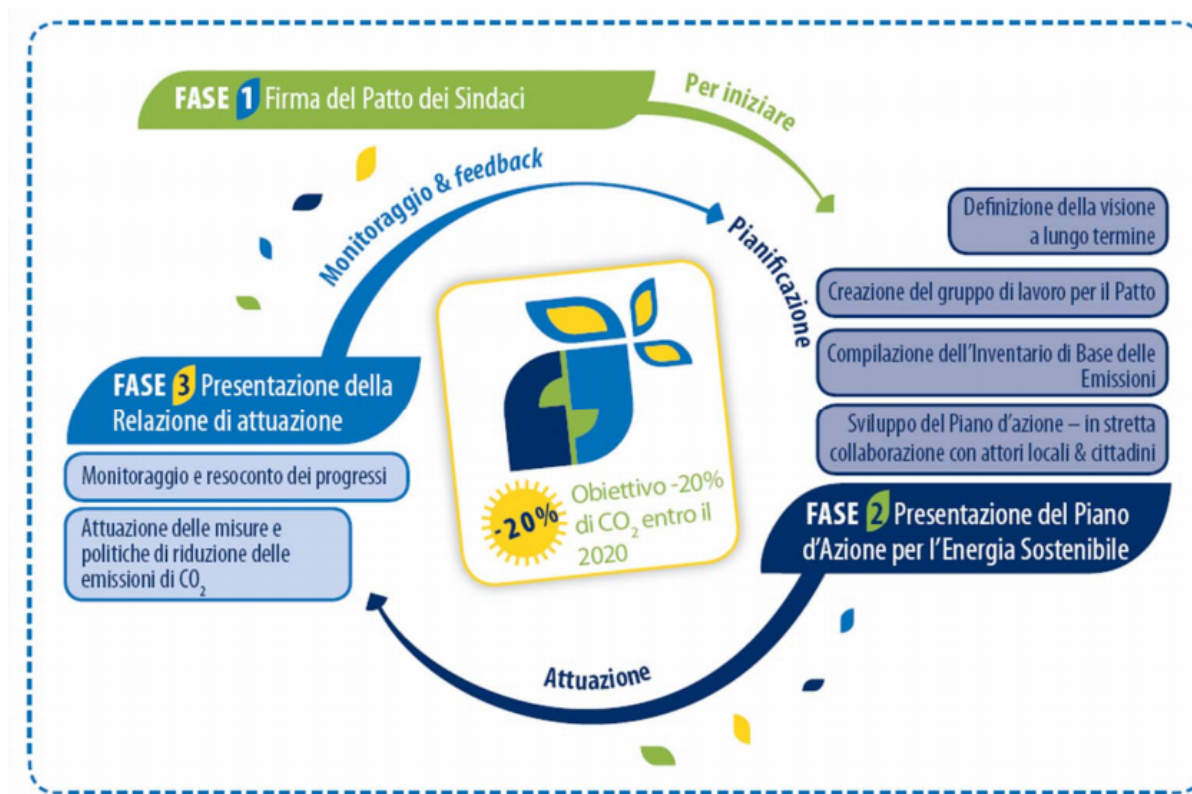


Figura 2.17. Fasi di attuazione del PAES (fonte Linee guida del PAES) [62].

2.1.3.1 Progetti europei inerenti la SEC

Le esperienze di alcuni programmi e progetti di successo della precedente programmazione (2010-17), come CONCERTO e CIVITAS, sono stati molto importanti per l'impostazione e la raffinazione dell'approccio europeo alla SMART City. CONCERTO ha sperimentato 53 progetti pilota basati su approcci integrati alla scala di quartiere o urbana di interventi di retrofit energetico completo e di installazione di impianti FER, dimostrando che è possibile abbattere del 50% le emissioni di gas serra del patrimonio edilizio con un ben strutturato programma di intervento e di finanziamento (EC, 2014) [63]. Il progetto CIVITAS invece si è concentrato sullo sviluppo di approcci integrati per l'implementazione di soluzioni di trasporto e mobilità sostenibile [64]. Sono stati finanziati nell'ambito del programma Horizon 2020 e dal Framework Programma diversi progetti, tra i quali Triangulum [65], SmarterTogether [66], REMOURBAN [67] e GrowSmarter [68], che hanno sviluppato soluzioni che integrano alla dimensione distrettuale, mediante interventi di efficientamento energetico degli edifici, sistemi di produzione di energia da FER e mobilità elettrica e sostenibile. Il focus di tali progetti è stato sperimentare nuove infrastrutture e procedure ICT e nello sviluppare approcci di Governance, finanziamento e implementazione efficaci nei contesti di riferimento (tabella 2.3).

Tabella 2.3. Alcuni progetti Horizon 2020.

Triangulum	SmarterTogether	REMOURBAN	GrowSmarter
Lighthouse: Stavanger, Eindhoven, Manchester	Lighthouse: Munich, Lyon and Vienna	Lighthouse: Nottingham, Tepebasi, Valladoli	Lighthouse: Stockholm, Barcelona, Cologne
Follower: Leipzig, Prague, and Sabadell	Follower: Santiago de Compostela, Sofia, Venice	Follower: Seraing, Miskolc	Follower: Graz, Porto, Suceava, Cork, Valetta
Costruire una centrale energetica alimentata da FER al 75% per tre edifici pubblici della municipalità di Stavanger.	Approfondire la conoscenza per la replicazione a larga scala.	Estendere il teleriscaldamento ed integrarlo con sistemi di solari termici.	Efficientamento energetico profondo degli involucri.
Testare sistemi di gestione energetica per gli edifici pubblici e privati.	Gestione dei dati.	Efficientamento energetico profondo per arrivare ad un quartiere a quasi zero emissioni.	Riduzione dei consumi di acqua e delle perdite di calore della ACS.
	Recupero sostenibile del patrimonio edificato.	Diffusione di sistemi PV.	Sistemi di gestione energetica e sensori di qualità dell'aria interna degli edifici recuperati.
	Mobilità elettrica.		Sperimentazione di sistemi logistici SMART per la costruzione degli edifici e il trasporto dei materiali.
	Approccio user centrico.		
	Modelli finanziamento di SMART City sostenibile orientati all'utente e all'innovazione.		

Il programma Horizon 2020 ospita un gran numero di progetti inerenti la *Smart City and Community* (figura 2.18), i cui elementi comuni possono essere riassunti nei seguenti:

- Utilizzo principale di tecnologie innovative già disponibili nel mercato
- Studio e applicazione di nuove tecnologie
- Utilizzo di fonti rinnovabili alla scala del singolo edificio e urbana
- Valutazioni di efficienza energetica per edifici e quartieri
- Sviluppo sostenibile urbano
- Approccio olistico al recupero ed efficientamento energetico degli edifici
- EMS, SMART Building, SMART Metering
- Trasparenza energetica e lotta alla fuel poverty
- Valutazione di fattibilità economica delle soluzioni proposte
- Approcci integrati con le diverse dimensioni della SMART City
- Coinvolgimento attivo degli attori locali nelle azioni della PA
- Strumenti di supporto alla decisione

- Linee guida e standardizzazione degli interventi



Figura 2.18. Progetti della EU SMART CITIES AND COMMUNITIES (accesso ottobre 2019) tratto da [69].

Il progetto Sinfonia [70], erede del progetto CONCERTO, parte da due Lighthouse Cities (Bolzano e Innsbruck), seguite da quattro Early Adopter Cities (La Rochelle (FR), Rosenheim (DE), Pafo (CV), Siviglia(ES) e Borås (SE)) e 42 Replication Cities (figura 2.19). Lo scopo del progetto è colmare il gap tra dimostrazione e trasferimento su larga scala degli approcci di efficientamento energetico del patrimonio edilizio, definendo, sperimentando e codificando:

- una serie limitata di tipologie e modelli distrettuali e di approcci per gli edifici (figura 2.20);
- strumenti di supporto alla fase decisionale e progettuale: modelli per l'Analisi SWOT;
- strumenti di supporto alla fase decisionale e progettuale: sviluppo UDEM per effettuare il bilancio energetico del quartiere e per definire lo scenario energetico base sul quale impostare il processo decisionale (figura 2.20);
- metodologie e strumenti di coinvolgimento degli attori locali con la mappa degli stakeholder (figura 2.21).

Lo strumento per la sintesi dello scenario base è impostato su base spaziale, con prospettive multi scala capaci di supportare approccio decisionale olistico e multi criteria, e facilitare la partecipazione dei decisori. Il progetto mette anche a disposizione delle città partecipanti al progetto uno strumento su base WEB per guidare nella impostazione del processo partecipativo, selezionando gli attori da coinvolgere e le tecniche più appropriate.

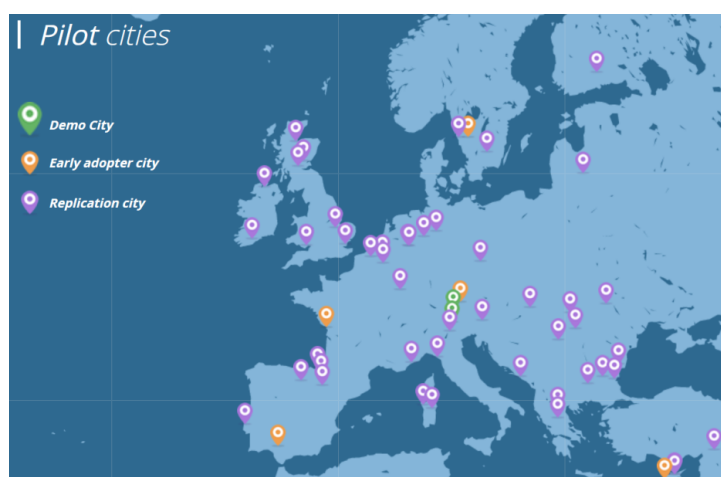


Figura 2.19. Città coinvolte nel progetto Sinfonia (accesso novembre 2019) [70].



	District 1	District 2	District 3	District 4	District 5	District 6	District 7	District 8	District 9	District 10
3D top view										
Characteristic	Apartment blocks	High Rise	Mid Rise	Mid Rise	Mid Rise	Mid Rise	Mid Rise	Mid Rise	Low Rise	Low Rise
Average height (m)	21.89	19.86	14.92	12.87	15	12.5	14.52	14.72	11.04	11.92
Example of building type										
Density	Open	Compact	Open	Open	Open	Compact	Compact	Compact	Compact	Compact
District shape										
Age class	Old to Semi-Modern	Old	Modern	Semi-Modern	Old	Semi-Modern	Old	Very Old	Old to Semi Modern	Very Old to Old
Age distribution										
Heating demand range (kWh/m ² ·a)	[90-130]	[130-170]	[20-60]	[85-125]	[145-185]	[60-100]	[145-185]	[165-205]	[170-210]	[190-230]

Figura 2.20. Definizione dello scenario base tramite approccio tipologico su base spaziale [71].

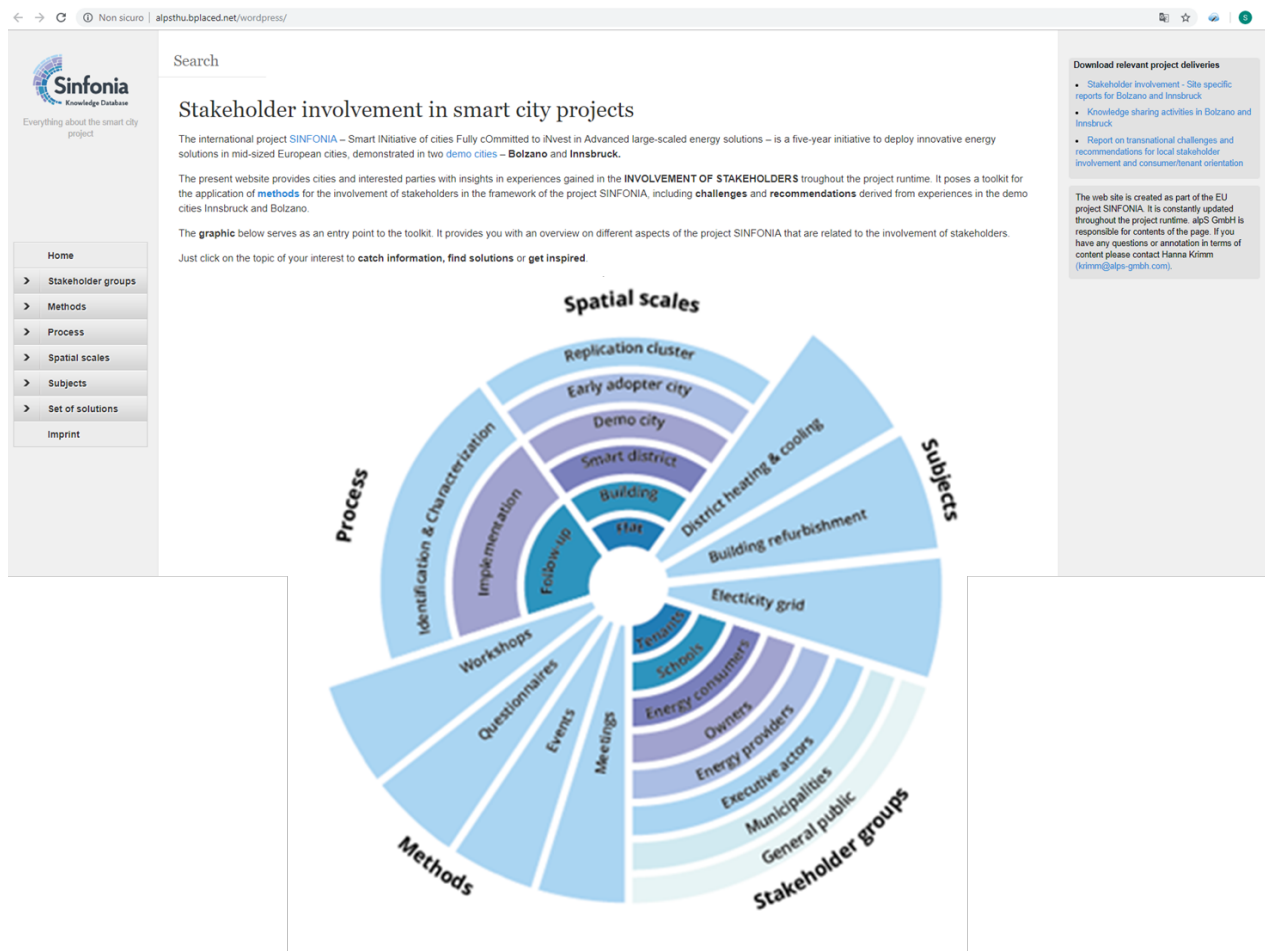


Figura 2.21. Strumento di supporto alla partecipazione [72].

2.2 Il processo progettuale e gli approcci tipologici

Ogni intervento di efficientamento energetico si configura come un intervento di modifica del sistema edificio impianto, con il generale adeguamento tecnologico dell'unità immobiliare. Si definisce un processo decisionale specifico, che procede verso la selezione delle tecnologie più adatte al miglioramento dell'efficienza del sistema nel rispetto dei vincoli tecnici, economici, normativi e delle aspettative e degli interessi e degli attori coinvolti. Un generico processo di riqualificazione energetica o, in senso più lato, sostenibile di un edificio può essere schematizzato in alcune fasi operative: progettuale, attuazione dell'intervento, monitoraggio (figura 2.22) [73]. A sua volta la fase progettuale può essere suddivisa concettualmente in tre fasi: una fase preliminare di raccolta del materiale e di definizione degli obiettivi nell'ambito delle risorse disponibili, una seconda fase di implementazione del modello energetico basato sull'audit dettagliato dello stato attuale dell'edificio, e una terza fase di selezione e valutazione delle ipotesi di intervento con la conseguente definizione delle priorità.

Nella prima fase il proprietario e/o colui che gestisce l'edificio, con la controparte tecnica del processo progettuale, individuano gli obiettivi generali del processo di efficientamento sulla base di una preliminare attività di audit dell'edificio e delle risorse disponibili. L'attività di audit è volta a individuare gli elementi salienti del sistema edificio impianto, sulla base della documentazione disponibile, ed esplicitare le condizioni al contorno che il processo di efficientamento deve rispettare, quali ad esempio:

- garantire accettabili livelli di comfort microclimatico e qualità degli ambienti, valutato rispetto all'uso attuale o a quello previsto dopo la ristrutturazione;
- garantire il rispetto degli standard qualitativi degli spazi legati alla destinazione d'uso attuale o prevista;
- preservare e valorizzare gli elementi di pregio architettonico dell'edificio e raggiungere accettabili livelli di qualità architettonica degli ambienti;
- garantire il rispetto delle caratteristiche storiche dell'edificio e del contesto paesaggistico di relazione.

La seconda fase si concentra sulla esecuzione di una attività di audit energetico, più o meno dettagliato, che consiste nel rilievo e la raccolta di dati sullo stato del sistema e sulla impostazione del modello energetico. Il rilievo può essere svolto in maniera tradizionale con l'eventuale supporto di schede, oppure tramite l'utilizzo di indagini strumentali. In letteratura sono disponibili diversi modelli energetici del sistema edificio impianto: da quelli che propongono dettagliate simulazioni fisiche basate su motori dinamici orari (es: Energy Plus [74], TRNSYS [75], etc), ai modelli stazionari o semi stazionari proposti dagli standard (UNI ISO 13790:2008, UNI 11300 TS). L'obiettivo di questa fase è quindi individuare con precisione gli elementi deboli del sistema e definire un modello affidabile per la successiva valutazione delle ipotesi di intervento.

La terza fase consiste nella scelta degli interventi di efficientamento e nella valutazione degli effetti sul sistema. La selezione tra i potenziali interventi di retrofit può essere una attività prettamente tecnica basata su semplici criteri tecnico economici, o comprendere anche altri criteri di natura multi disciplinare, che possono coinvolgere anche un gruppo variegato di attori interessati e decisori. Questo è il caso dei protocolli di certificazione ambientale, che in questi anni stanno avendo una straordinaria diffusione per il supporto alla progettazione di interventi di recupero sostenibile ed efficientamento energetico, sia per gli edifici pubblici e privati, che a scala urbana o di quartiere (es: Protocollo GBC LEED [76], Protocollo ITACA [77], CASBEE [78]). Le semplici valutazioni di fattibilità tecnico economica sono tipicamente il caso dei processi di retrofit che riguardano unità immobiliari destinate alla residenza o di basso valore, dove la decisione è spesso lasciata a una valutazione tecnica di efficacia mediata dalle aspettative, le preferenze e le risorse del proprietario dell'edificio. Il secondo caso (figura 2.23) invece è più confacente agli edifici pubblici, dove possono convergere diversi tipi di interesse [79]. In questi casi la valutazione può diventare complessa perché deve forzatamente considerare aspetti di diversa natura, non sempre direttamente confrontabili e valutabili quantitativamente, e coinvolgere un vasto numero di partecipanti caratterizzati da profili culturali e interessi differenti. In letteratura la risoluzione di questi problemi decisionali è affrontata tramite procedure basate sulla interazione più o meno strutturata con gli stakeholder, eventualmente integrata con sistemi supporto

alla decisione, basati su algoritmi decisionali complessi (Analisi Multi Criteri, Ottimizzazione Lineare, Analisi multi obiettivo, etc) [80].

Nella attuale concezione di un processo di *retrofitting*, assume poi un ruolo fondamentale la fase di monitoraggio delle condizioni del sistema post intervento, che ha la doppia finalità di verificare l'efficacia delle azioni effettuate e sensibilizzare l'utente finale a un corretto e responsabile uso dell'edificio tramite opportuni sistemi.

In questo senso, da un punto di vista prima culturale che operativo, lo scenario italiano appare alquanto arretrato rispetto a ciò che viene già fatto in altri contesti. Tradizionalmente, in Italia, viene dato maggior risalto al momento progettuale rispetto alla fase realizzativa e, al più, a quella gestionale e manutentiva. La qualità intellettuale e tecnologica del processo progettuale, così come le capacità degli attori coinvolti, sono decisamente maggiori rispetto alle fasi successive del processo edilizio. Se l'impresa, come spesso accade, soffre di carenza di competenze tecnologiche adeguate, ancora più evidente è l'incapacità del soggetto preposto alla gestione e manutenzione del cespite (nella stragrande maggior parte dei casi identificabile con il singolo proprietario). Questo è uno dei principali motivi per cui, a fronte della forte cogenza di istanze trasformative, come quella dell'efficienza energetica, il sistema edilizio nazionale si trova completamente impreparato ad applicare innovazioni tecnologiche che, ormai da tempo, il mercato dei prodotti edilizi e impiantistici propone, ma che non trovano diffusa applicazione per i limiti intrinseci del processo edilizio, almeno nella sua connotazione nazionale. Introdurre innovazioni tecnologiche di processo e non solo di prodotto, che consentano di ristrutturare i meccanismi manutentivi e gestionali e che, soprattutto, siano ricombinanti, nel senso che consentano la creazione di nuovi soggetti trasversali che siano in condizione di migliorare tali processi, appare quanto mai indispensabile. È evidente che, in questo scenario, la digitalizzazione della raccolta delle informazioni, della loro elaborazione, della rappresentazione e della simulazione di scenari di intervento consapevoli, rivestirà un ruolo determinante [81].

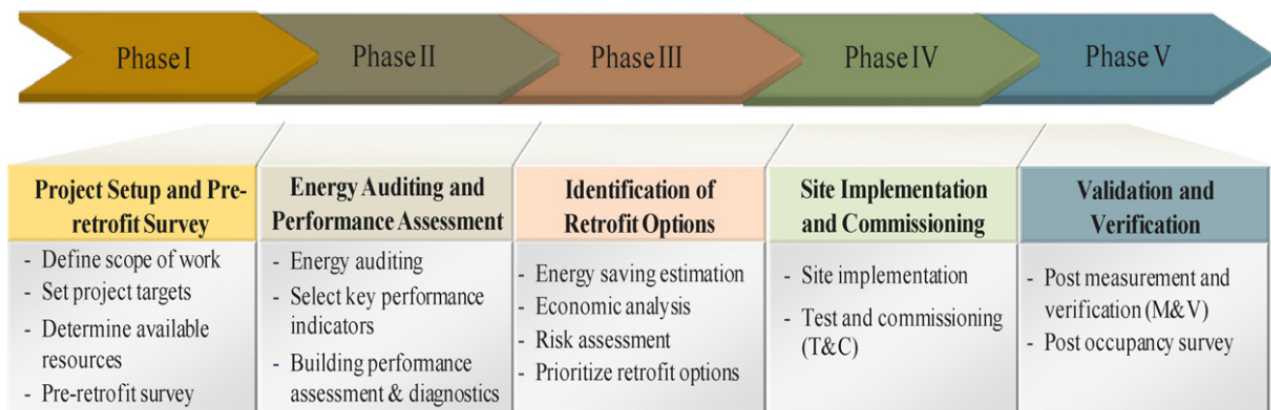


Figura 2.22. Schema generale di un processo di *retrofitting* energetico di un edificio (tratto da[73]).

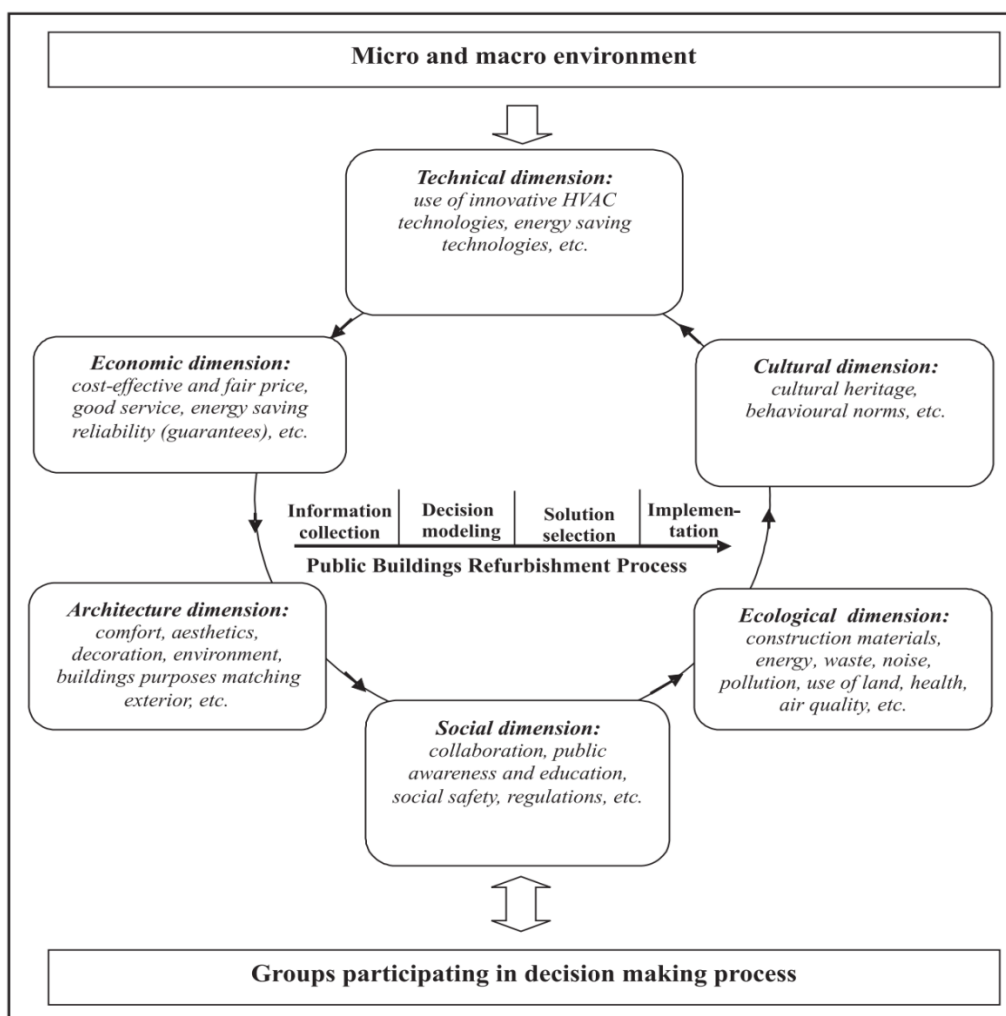


Figura 2.23. Fattori che influenzano il processo decisionale per un efficientamento energetico di un edificio pubblico (tratto da [79]).

2.2.1 Linee guida e approcci tipologici

In letteratura si possono ritrovare due principali approcci metodologici alla progettazione dell'efficientamento, caratterizzati da diversi livelli di dettaglio [82].

Il primo, caratterizzato da maggiore dettaglio, si concentra sulla redazione di accurate diagnosi energetiche e sulla ricerca di soluzioni tecniche a carattere innovativo studiate in maniera specifica per l'edificio. Questi studi sono generalmente basati sull'analisi dettagliata delle caratteristiche dell'edificio e delle sue condizioni d'uso. Gli studi sono spesso attuati tramite l'utilizzo, più o meno estensivo, di sistemi di rilievo innovativi [83] e spesso adottano sistemi BIM per supportare la successiva fase di attuazione del progetto [84]. La valutazione tecnico economica delle tecnologie utilizzabili è effettuata tramite modelli energetici dinamici del sistema edificio impianto fisicamente accurati, e il confronto tra alternative progettuali talvolta utilizza strumenti di supporto alla decisione basati su raffinati algoritmi decisionali. Questi lavori sono spesso supportati da altre analisi specifiche o approcci innovativi di indagine strumentale o di rilievo dei profili di uso. L'ambito di utilizzo di questi approcci si focalizza su edifici caratterizzati da alti valori, in quanto richiede il coinvolgimento di un team multidisciplinare di lavoro, che implica una alta disponibilità di risorse.

L'approccio metodologico e gli strumenti possono essere esportati su contesti simili, ma lo studio può essere considerato un progetto di ricerca a sé stante, che richiede un'alta particolarizzazione dell'approccio.

Il secondo approccio progettuale sposta l'attenzione sulle caratteristiche ricorrenti o "tipologiche" del patrimonio edificato, che possono indirizzare verso la scelta delle tecnologie impiantistiche più appropriate e supportare nello studio delle caratteristiche dello specifico edificio [85]. Queste categorie tipologiche possono riguardare diversi aspetti del sistema edificio impianto, ma anche le caratteristiche salienti delle soluzioni tecnologiche più consolidate per l'efficientamento. Questi studi partono sempre dall'analisi di un campione di edifici rappresentativi; i risultati sono poi generalizzati tramite appropriate procedure alla scala più ampia (quartiere, città, regione, etc) per esplicitare le caratteristiche del patrimonio edilizio che possono essere di indirizzo per il progetto di politiche e strategie di incentivazione. Restringendo il campo di studio a un gruppo di edifici sufficientemente omogeneo, per tipologia o per contesto territoriale, possono essere definite delle linee guida basate sulle caratteristiche ricorrenti del patrimonio e sulla disponibilità locale di tecnologie consolidate, contribuendo a limitare i costi per il progetto degli interventi. La valutazione tecnico economica delle soluzioni tecnologiche è effettuata tramite l'utilizzo di modelli energetici semplificati, generalmente coerenti con le normative tecniche nazionali, applicati seguendo specifici protocolli metodologici. L'approccio tipologico al progetto degli interventi è meno affidabile di quello di dettaglio e, per alcuni edifici aventi caratteristiche particolari, può essere fortemente inadeguato. D'altra parte è di più semplice applicazione, perciò sembra essere appropriato per il patrimonio edificato "ordinario" o nei casi di scarsa disponibilità di risorse. Gli approcci tipologici sono la base delle normative tecniche e dei protocolli di certificazione: esse adottano semplificazioni di calcolo rispetto al modello fisico e approcci tabellari basati sulle caratteristiche ricorrenti degli elementi del sistema edificio impianto, al fine di limitare i costi delle fasi di progetto e di garantire risultati confrontabili tra loro pur mantenendo un sufficiente grado di affidabilità. Anche gli standard tecnici europei (EN ISO 13790:2008) e le sue specificazioni italiane (pacchetto UNI TS 11300:2008 e norme collegate) per il calcolo della prestazione energetica degli edifici fanno largo uso di approcci tipologici per la definizione delle caratteristiche fisico costruttive delle strutture e per quelle prestazionali degli impianti, inoltre settano procedure di calcolo di complessità graduale in funzione dello scopo per il quale sono eseguite (Asset Rating, Design Rating, Tailored rating, Operational Rating). L'approccio tipologico può essere sviluppato a varie scale: esso è ampiamente utilizzato per supportare nella definizione di politiche e strategie di efficientamento del patrimonio immobiliare alla scala regionale o nazionale e anche nella definizione di scenari progettuali alla scala urbano di quartiere [86].

Lo sviluppo e la diffusione di linee guida e protocolli di intervento, orientati al supporto degli operatori del settore nella scelta e nell'utilizzo delle tecnologie e alla diffusione delle conoscenze tecniche, è uno dei pilastri della strategia europea per il perseguimento degli obiettivi di efficientamento del patrimonio edificato [87]. Le linee guida possono essere indirizzate all'utilizzo di specifiche tecnologie, dedicate ad alcune classi omogenee di edifici, oppure legate a un contesto territoriale peculiare. Esse sono generalmente di natura volontaria e non prescrittiva e possono supportare il processo di efficientamento solo in alcune attività specifiche, oppure accompagnarlo in tutto lo svolgimento, contribuendo a migliorare la qualità del processo edilizio. In generale, si compongono di una parte documentale, orientata a definire un quadro esaustivo delle conoscenze che stanno alla base del processo progettuale e una metodologico strumentale, che guida nella esecuzione stessa del processo). Gli elementi ricorrenti del sistema edilizio sono descritti negli abachi tramite le caratteristiche che influenzano la prestazione energetica e il comfort interno, ma possono riportare anche altre informazioni legate alla integrazione col contesto specifico a cui le linee guida si riferiscono. Le soluzioni tecnologiche sono generalmente descritte nei loro principali aspetti tecnici, enfatizzando gli aspetti relativi all'integrazione con le strutture edilizie esistenti. Per guidare alla selezione tra le tecnologie, sono spesso definite delle scale di priorità basate su criteri comunemente accettati o legati alla specificità del contesto o dell'argomento trattato dalle linee guida stesse.

Di grande utilità sono anche gli studi dedicati a tipizzare i profili d'uso del patrimonio edilizio, che possono generare un importante fattore di incoerenza tra le prestazioni energetiche attese e quelle reali. Il fattore umano infatti può generare profili di consumo molto differenti anche per unità immobiliari assolutamente identiche in termini di sistema edificio impianto.

Gli approcci tipologici sono la base per la definizione di linee guida per il miglioramento tecnologico e l'efficientamento energetico di edifici specialistici, che sono caratterizzati da una certa ripetitività nelle soluzioni costruttive e impiantistiche e nelle problematiche d'uso, come possono essere scuole, uffici, centri commerciali, aree espositive, e altri. Nel contesto italiano il recupero degli edifici scolastici è al centro di un vasto programma di riqualificazione promosso a livello nazionale e attuato su base regionale e locale. Gli edifici scolastici, siano essi storici (ossia costruiti prima del 1950) o realizzati più di recente, sono spesso caratterizzati da soluzioni costruttive decisamente ricorrenti, soprattutto se analizzati a livello locale, in quanto edificati nell'ambito di programmi di edilizia pubblica pluriennali.

2.2.1.1 Linee guida per edifici pubblici

In letteratura si ritrovano diversi esempi di studi volti a caratterizzare il patrimonio pubblico a diversa scala, in modo da individuare un set preliminare di ipotesi di intervento, sulla base delle quali l'amministrazione possa definire il proprio programma di efficientamento, tenendo conto delle priorità e delle risorse disponibili. Tali studi si basano sulla preliminare ricognizione della consistenza del patrimonio, seguito dallo studio, con metodi più o meno accurati, di un campione rappresentativo di esso, finalizzato alla identificazione delle prestazioni energetiche tipiche, dei fenomeni di degrado più frequenti e delle problematiche inerenti le condizioni d'uso più diffuse. Negli edifici scolastici, oltre all'efficientamento energetico, le priorità sono migliorare la qualità degli ambienti interni delle aule ed enfatizzare il ruolo educativo delle soluzioni tecnologiche volte al miglioramento della sostenibilità in senso più lato [88]. Nel caso degli edifici espositivi, la priorità è la protezione dei reperti da condizioni microclimatiche che possano favorirne il degrado. L'approccio più diffuso sottolinea l'importanza della progettazione di zone termiche differenti per lo spazio adatto alla fruizione umana e quello dedicato alla conservazione dei reperti, tramite l'accurato studio delle condizioni microclimatiche dei locali dell'edificio e un sistema impiantistico fortemente personalizzato [89].

Uno dei temi emergenti è la sperimentazione di metodologie e infrastrutture tecnologiche per rendere i fruitori degli edifici pubblici consapevoli del tema energetico legato all'immobile ed al suo uso. Si adottano sistemi per visualizzare (energy visualization) e rendere pubblici (trasparenza energetica) i consumi energetici per i diversi usi legati all'edificio e comunicare le azioni intraprese per il loro contenimento.

L'ampio tema della manutenzione, della gestione e del miglioramento del patrimonio costruito ha trovato di recente un'interessante sponda nel campo del BIM. Per quanto questo approccio integrato sia indubbiamente promettente, la sua adozione nell'ambito degli interventi di ristrutturazione e di *retrofitting* è ancora a un livello embrionale [90]. Nonostante l'urgente necessità di migliorare la qualità e la funzionalità del patrimonio edilizio esistente, tutti i processi correlati alla sua trasformazione vengono ancora effettuati con strumenti e metodi analogici tradizionali. La causa principale consiste nel fatto che un'applicazione efficiente della metodologia BIM si trova ad affrontare una serie di criticità, quali l'identificazione di informazioni necessarie per l'intervento di *retrofitting*, la raccolta e la corretta interpretazione dei dati monitorati, la gestione dell'incertezza e le elevate risorse necessarie per la creazione del modello dell'edificio esistente [91]. Per gli interventi di riqualificazione degli edifici esistenti il modello informativo deve essere generato dallo stato 'as-built' a partire da una scarsissima, se non nulla, documentazione d'archivio [92].

Tra tutte le possibili informazioni che possono essere raccolte durante l'analisi di un edificio esistente, quelle che riguardano il comportamento energetico e i consumi sono fra le più complesse e dettagliate. La prima fase di tale procedura richiede la raccolta di dati climatici per quanto riguarda il luogo di costruzione. Questi possono essere influenzati dal contesto costruito e naturale che circonda l'edificio, e per questo motivo deve essere modellata almeno la geometria delle ostruzioni nelle vicinanze. Successivamente devono essere necessariamente raccolti i dati sull'involucro opaco e trasparente, insieme ad altre grandezze derivate, come la trasmittanza termica stazionaria e periodica. In merito a impianti elettrici e termici, devono essere raccolte e/o valutate le informazioni relative alle loro caratteristiche principali e le conseguenti prestazioni energetiche. A differenza degli audit industriali, dove è definito esattamente l'output dei processi produttivi, quelli edilizi richiedono anche la valutazione delle condizioni operative dell'edificio e del suo profilo di uso [93].

La crescente presenza negli edifici di sistemi BEMS e BACS, mette a disposizione una grande quantità di dati su consumi, condizioni ambientali interne ed esterne e profili d'uso che possono essere di grande aiuto nelle procedure di audit energetico. È anche possibile l'integrazione nei diversi componenti dell'edificio di sensori in grado di raccogliere dati sulle condizioni termiche interne. In entrambi i casi, l'incertezza di misura è però molto superiore a quella di dispositivi di monitoraggio microclimatici certificati, che però sono decisamente più ingombranti. In questo senso, quindi, è fondamentale che la ricerca continui a sperimentare strumenti e metodologie sempre più evoluti che consentano di acquisire dati attendibili sulla consistenza costruttiva e materica del patrimonio costruito, nonché sulle sue prestazioni energetiche e sui profili di utilizzo. È inoltre evidente ormai che questi dati non possono che essere gestiti, elaborati e rappresentati in ambienti digitali basati sul BIM.

2.2.1.2 Linee guida per edifici storici

Una delle tematiche al centro di un forte interesse disciplinare è l'intervento sugli edifici storici, perché il miglioramento dell'efficienza si combina con la generale necessità di adeguamento tecnologico e funzionale e si scontra con le istanze di tutela e valorizzazione dei valori storici e architettonici [94]. Alcuni recenti progetti europei [95] e diverse normative [96] e protocolli nazionali [97] sono orientati a dare linee guida per supportare nella definizione di azioni di efficientamento energetico e miglioramenti tecnologico funzionale in edifici storici (monumentali o ordinari), cercando di mantenere un equilibrio tra la ricerca della performance e le esigenze di tutela dei valori architettonici e paesaggistici proprie del restauro. Il patrimonio edificato storico, che costituisce la maggior parte dei nuclei storici delle città europee, è interessato da un diffuso fenomeno di abbandono e degrado: la tutela e la valorizzazione di questo immenso patrimonio implica il suo riuso e adattamento ai requisiti tecnico funzionali degli edifici moderni, che vedono nell'efficientamento energetico uno dei possibili motori economici per la sua attuazione [98].

Una delle criticità che sottende l'efficientamento degli edifici storici è la difficoltà di utilizzare approcci fortemente ripetitivi, in quanto ogni edificio è il risultato delle azioni di degrado e di molteplici modifiche che lo rendono unico. Le linee guida non sono un elenco vincolante di soluzioni tecnologiche pronte all'uso, ma indicano dei metodi e raccolgono le conoscenze di base per sviluppare progetti adattati alle specificità dell'edificio. I criteri di progetto degli interventi generalmente accettati per minimizzare l'impatto delle azioni di rinnovamento sull'edificio possono essere così riassunti:

- il processo progettuale deve essere basato su una attenta analisi dei valori storici delle componenti dell'edificio, considerati in relazione ai valori paesaggistici del contesto territoriale di relazione;
- il processo progettuale deve partire dall'analisi degli usi attuali o degli usi futuri dell'edificio e dei suoi ambienti, prendendo in considerazione anche un punto di vista adattivo;
- il processo progettuale deve privilegiare le tecnologie con minore impatto nelle componenti di valore dell'edificio, e quelle più facilmente reversibili;
- l'obiettivo non è un adeguamento a predeterminati obiettivi di efficienza, ma il miglioramento delle prestazioni nel rispetto dei caratteri storici dell'edificio e dei livelli di servizio richiesti.

Il progetto deve partire dalla valutazione preliminare dei valori storico paesaggistici che caratterizzano l'edificio: gli edifici di valore maggiore "monumentali" sono gravati da stringenti vincoli di protezione, essi sono generalmente inseriti in specifici elenchi (nazionali o internazionali); tuttavia tutti gli edifici costruiti prima del 1950 sono considerati da preservare in quanto esempio delle tecniche costruttive tradizionali [99]. Si possono adottare differenti approcci progettuali per gli edifici che hanno valore, in quanto depositari di alcuni fatti identitari, o edifici storici ordinari, che assumono valore solo in quanto parte di un bene paesaggistico di insieme. Inoltre il rapporto con il contesto gioca un ruolo fondamentale nella definizione delle strategie progettuali, perché anche un edificio storico ordinario può essere protetto da forti vincoli se inserito in contesto paesaggistico di pregio o se parte dello scenario di un bene culturale di pregio. Alcuni approcci, fortemente conservativi, suggeriscono che anche gli edifici moderni più recenti possano essere meritevoli di una qualche protezione, in quanto considerati testimoni della storia dello specifico

insediamento urbano [100]. È il caso di quartieri disegnati in maniera unitaria, che sono il segno tangibile dei fatti storici recenti di un insediamento urbano e che possono costituire un elemento identitario importante nel contesto locale. Essi sono spesso quelli che presentano indici di performance peggiori e determinano la quota maggiore dei consumi del settore residenziale.

Il processo di ristrutturazione di un edificio storico deve considerare il profilo d'uso attuale e quello previsto che implica, in primo luogo, la valutazione dei parametri microclimatici interni finalizzata a garantire il rispetto dei requisiti di comfort specifici di ogni ambiente. In secondo luogo il profilo d'uso può essere rimodulato in maniera adattiva, al fine di limitare il fabbisogno e/o facilitare l'applicazione di alcune azioni di efficientamento: variando l'articolazione delle zone termiche e degli usi a esse collegati, modificando le partizioni interne, o in estrema ratio, escludendo alcuni usi che possono generare forti impatti sulle strutture dell'edificio e sulla efficienza del sistema [101].

Alcune linee guida propongono metodologie che supportano nella selezione delle ipotesi progettuali più adatte al miglioramento tecnologico, sulla base delle caratteristiche specifiche dell'edificio, identificando una vera e propria scala di priorità nella valutazione di tecnologie di *retrofitting*, che predilige gli interventi di minore impatto sugli elementi di pregio storico dell'immobile [102]. Altre propongono abachi di soluzioni tecnologiche valutate rispetto agli impatti sulle caratteristiche principali del sistema edificio impianto [103]. Sottolineando l'importanza della ricerca di soluzioni progettuali personalizzate, ma guidate da criteri di minimizzazione dell'impatto sulle componenti storiche dell'edificio, si introduce il concetto di "miglioramento" delle prestazioni energetiche e più in generale delle dotazioni tecnologiche in luogo dell'"adeguamento", che richiede il raggiungimento di limiti prestazionali rigidi definiti a priori [104] [105]. Lo sviluppo di approcci tipologici a carattere locale, dedicato a questo tipo di edifici, è uno dei temi centrali per favorire il recupero del patrimonio storico.

Le linee guida del Mibact [95] suggeriscono che i contenuti degli studi progettuali e le indagini conoscitive debbano essere commisurate al valore del bene. In accordo con quanto suggerito negli standard, gli studi preliminari agli interventi di efficientamento si articolano su tre livelli progressivi di approfondimento (tabella 2.4): preliminare o di primo livello, standard o di secondo livello, di terzo livello. La diagnosi preliminare è un'attività che deve essere economica e di rapida esecuzione, può essere sufficiente nei casi più semplici, ma è comunque lo step iniziale anche di attività più approfondite di analisi. La diagnosi di primo livello è consigliata in caso di edifici ordinari: si raccomanda l'utilizzo di modelli energetici e attività di indagine consolidate e regolate dalle normative tecniche, al fine di garantire l'esportabilità dei risultati e facilitare la comunicazione. Il terzo livello è riservato agli edifici di maggiore valore e a situazioni particolari, in quanto richiede ingenti risorse tecnico economiche per effettuare studi di dettaglio e realizzare soluzioni tecnologiche fortemente personalizzate. Le linee guida Mibact sottolineano l'importanza di valutare il pregio storico e identitario di tutti gli elementi dell'edificio, compresi quelli impiantistici più legati alle architetture moderne anni 30-50. Per un edificio significativo degli anni '50, adibito a uso pubblico, potrebbe avere significato il recupero funzionale dei vecchi radiatori in ghisa, anche se inefficienti rispetto a soluzioni contemporanee basate su sistemi a bassa temperatura. Al contrario lo stesso elemento in un edificio a uso privato, privo di particolare valore, potrebbe essere facilmente sostituito con tecnologie attuali.

Tabella 2.4. Prospetto dei livelli della diagnosi energetica.

Livello di analisi	Quando utilizzarlo	Tipo di analisi energetica	Ipotesi di intervento
Preliminare	Interventi poco impattanti Edifici ordinari Scarsità risorse	Indagini speditive Confronto con altri edifici simili o con esempi in letteratura Analisi della documentazione disponibile	Consigli Soluzioni tecnologiche consolidate con limitato rischio economico
Primo livello	Edifici ordinari e/o edifici di pregio ma con configurazioni del sistema edificio – impianto comuni	Indagini accurate ma standard Modello energetico standard (coerente con le normative) adattato all’edificio	Analisi di fattibilità tecnico economica di soluzioni impiantistiche consolidate combinare in diversi scenari di intervento.
Secondo livello	Edifici caratterizzati da alto valore storico e/o economico caratterizzati da configurazioni del sistema edificio – impianto particolari	Indagini accurate anche con sistemi innovativi Modelli energetici dinamici fortemente personalizzati Altre analisi specialistiche	Analisi di fattibilità economica di Soluzioni tecnologiche fortemente personalizzate e sperimentali

2.2.1.3 Approccio tipologico nella strategia comunitaria

Per dare un’idea dell’importanza degli approcci tipologici, basti pensare che, secondo quanto già previsto a partire dalla Direttiva Europea 2010/31/UE, la definizione della *cost-optimality* degli attuali limiti prestazionali negli interventi di riqualificazione o ristrutturazione energetica degli edifici è stata definita, a livello di singoli Stati Membri, attraverso analisi di questo tipo, applicato all’intero patrimonio nazionale. Il Regolamento 244/2012, infatti, chiariva come questi dovessero essere calcolati (o verificati se già presenti nel recepimento della 2002/91/CE), sia per la nuova edificazione che per l’intervento sull’esistente. L’implementazione di un tale approccio non è evidentemente banale, sicuramente per almeno due motivi. Il primo è che richiede una analisi tipologica del parco edilizio esistente dal punto di vista costruttivo, del ciclo di vita utile, della manutenzione e dei costi di funzionamento (e quindi anche energetici, sia sotto il profilo qualitativo che quantitativo). Oltre a questo, è necessario avere la conoscenza di fattori macroeconomici, come l’evoluzione del costo dell’energia e il tasso di sconto da adottare, e condurre un’analisi di sensitività di questi due ultimi parametri. La procedura codificata dal legislatore europeo parte dall’individuazione degli edifici di riferimento, che possono essere raggruppati in categorie e sottocategorie. Per quanto riguarda la costruzione del quadro metodologico (Allegato I del Regolamento citato), è doveroso evidenziare che questo prevedeva una campionatura decisamente limitata: almeno un edificio nuovo e almeno due per ristrutturazioni totali per ogni categoria. È però indicato che si possano assumere delle sottocategorie differenziate, ad esempio, per dimensioni, età, struttura dei costi, materiali costruttivi, modelli d’uso o zona climatica. A livello nazionale, il gruppo di lavoro italiano ha predisposto un’analisi che ha utilizzato come riferimento il Progetto TABULA [106], l’analisi sugli edifici ad uso ufficio condotta dall’ENEA [107], oltre ai dati statistici sugli impianti forniti dal CRESME.

L’analisi tipologica dell’intero patrimonio costruito italiano è quindi basata sostanzialmente su 8 campioni virtuali, replicati in 2 fasce climatiche. Per quanto riguarda il residenziale è doveroso sottolineare che i campioni del progetto TABULA, come indicato dagli stessi autori, sono relativi a una sola fascia climatica, che per quanto rappresentativa di 4250 comuni su 8100, trascurava completamente il resto del patrimonio costruito. Né l’astrazione fatta nel calcolo in questione, ovvero quella di riportare i campioni a una fascia climatica più calda (la B), modificando esclusivamente i connotati tecnologici e non quelli morfologici, appare esaustiva. Lungi dal voler essere una critica al lavoro compiuto dagli autori citati, quanto sopra riportato vuol solamente mettere in evidenza quanto sia importante per le politiche di efficientamento la possibilità di avere una campionatura attendibile del patrimonio e come sia urgente e necessario un lavoro più ampio di indagine, che sia maggiormente caratterizzato da analisi riferite, ad esempio, ai contesti locali. Lavorando

infatti, a una scala più ridotta, ad esempio urbana, è possibile ridurre gli effetti discorsivi nella campionatura, che una popolazione statisticamente varia come quella edilizia italiana presenta, per ragioni, ad esempio, squisitamente climatiche. Tenendo conto dell'alto tasso di urbanizzazione della popolazione italiana e considerando che gli edifici urbani sono in genere i più energivori, è auspicabile che l'approccio tipologico possa trovare un'applicazione nella maggiori città italiane.

2.3 Modellazione Energetica del Patrimonio Edilizio a scala urbana

2.3.1 Caratteristiche generali

Lo sviluppo di strumenti per la modellazione energetica del patrimonio edificato (Building Stock Energy Modelling - BSEM), e più in generale dei sistemi urbani, è stato negli ultimi anni oggetto di uno straordinario interesse scientifico di natura fortemente multidisciplinare, tanto da delinearsi come una disciplina a sé stante [108]. Le prime esperienze nascevano come strumenti per la previsione della domanda energetica del settore civile residenziale, a supporto della politica energetica nazionale, ma anche di scala locale. Più recentemente questi strumenti hanno avuto un forte sviluppo come supporto per la definizione di strategie di pianificazione energetica decentralizzata e per la pianificazione urbana sostenibile [109]. In generale i modelli e gli strumenti, pur con una forte variabilità di metodologie e finalità, sono focalizzati sulla determinazione del fabbisogno energetico del patrimonio edificato con diverso dettaglio spaziale e temporale, e sullo studio della configurazione ottimale di un mix tecnologico per il suo soddisfacimento [110]. Esistono numerose esperienze che, con metodologie e approcci differenti, studiano le caratteristiche della domanda energetica del patrimonio edilizio per prevederne gli andamenti in funzione di parametri macroeconomici o dei miglioramenti tecnologici; poche però sono in grado di esplicitare spazialmente i contributi locali con una scala utile alla pianificazione urbana [111].

Analizzando un vasto numero di contributi presenti nella letteratura internazionale, Keirstead [112] applica una Cluster Analysis in funzione dello scopo dichiarato dello strumento e degli approcci utilizzati nella modellazione con l'intento di individuarne le caratteristiche ricorrenti, i punti di forza e di debolezza. Sono risultate cinque categorie di modelli riferiti al fabbisogno energetico del patrimonio edificato, individuati rispetto agli approcci adottati per la dimensione temporale e spaziale, il metodo di calcolo, e la modellazione della domanda e della fornitura energetica: Technology Design, Building Design, Urban Climate, System Design, Policy Assessment (tabella 2.5). L'autore stesso precisa che molti modelli possono ricadere in una o più categorie per i diversi aspetti che li caratterizzano, e che i cluster hanno comunque una forte connotazione discrezionale. Tuttavia si possono individuare alcuni elementi di criticità comuni alla maggior parte dei modelli analizzati, quali la mancanza di integrazione tra i modelli, la loro intrinseca complessità, la disponibilità di dati certi, su cui basare l'analisi e la difficoltà di ottenere risultati realmente affidabili e significativi per i Policy Makers. Gli strumenti sono sviluppati per rispondere ad aspetti specifici e difficilmente descrivono le relazioni tra i diversi elementi del sistema urbano complesso: le condizioni microclimatiche influiscono sul fabbisogno energetico degli edifici, ma anche il calore disperso dai sistemi di climatizzazione e le condizioni di traffico veicolare condizionano il microclima stesso. Modelli complessi basati su dettagliate simulazioni fisiche assicurano risultati più verosimili e affidabili, ma necessitano di una quantità maggiore di dati di ingresso e di onerose opere di interpretazione dei risultati affinché possano essere utilizzati per la definizione di politiche o strategie. Al contrario i modelli semplificati, basati su un minore set di dati di partenza, sono di più facile utilizzo e comprensione, ma possono essere gravati da forti limiti di affidabilità che derivano dalle assunzioni iniziali adottate.

Con l'aumento delle capacità dei comuni calcolatori e il raffinamento di strumenti di supporto alla trattazione, visualizzazione e diffusione dei dati (GIS, BIM, WEB interfacce, Cloud computing, etc) si stanno sviluppando degli strumenti di nuova generazione che hanno come obiettivo preciso il supporto alle attività di pianificazione alla scala urbana e di quartiere. Gli UBEM sono caratterizzati da un preciso riferimento allo studio del contesto urbano, che può anche integrare tematiche di natura differente, e sono in genere concepiti per delineare metodologie e strumenti esportabili in altri contesti e utilizzabili anche da personale con ordinarie competenze tecniche [108]. Molti di essi sono sviluppati in ambiente GIS e fanno largo uso di informazione spaziale che, grazie alla sua spiccata interoperabilità, permette lo sviluppo di interfacce per la diffusione dell'informazione via WEB, la condivisione di nuovi algoritmi e procedure, e l'integrazione con metodologie di supporto alla decisione spaziale (Spatial Decision Support System - SDSS).

Analizzando diversi contributi in letteratura, si possono individuare alcuni aspetti che dovrebbe essere considerati per lo sviluppo di un efficace UBEM finalizzato alla simulazione di scenari di riqualificazione energetica in ambito urbano [113] [114] [108] [112]:

- avere un dettaglio spaziale capace di esplicitare le particolarità delle diverse parti della città in

modo da integrarsi con la pianificazione urbana, e di legare, i luoghi dei consumi con la produzione;

- poter esplicitare, anche in maniera semplificata, l'influenza degli elementi di fabbrica degli edifici, degli impianti, della fornitura energetica e degli stili di consumo dell'utente finale;
- supportare nella definizione del potenziale di retrofit energetico con nuove tecnologie e nella valutazione e scenari più complessi di trasformazione (SDSS, MCDA, ...);
- rappresentare i risultati conformemente ai linguaggi delle normative tecniche e degli strumenti di governo del territorio locali;
- garantire minimi, ma significativi risultati anche con un limitato set di dati di ingresso basato sui dati già disponibili o su attività speditive di rilievo;
- garantire lo sviluppo diacronico e dinamico dell'informazione legato a procedure automatiche o semi automatiche di aggiornamento dei dati base e dei risultati di calcolo;
- prevedere GUI e procedure semplificate per permetterne l'uso anche da parte di personale con ordinarie conoscenze tecniche;
- utilizzare interfacce di dialogo semplificate e metodologie per facilitare la partecipazione anche per attori non esperti;
- essere aperto e flessibile all'implementazione di nuove funzioni e altri moduli per l'analisi dell'ambiente urbano;
- prevedere una rappresentazione sintetica dei risultati e degli scenari (indicatori o indici aggregati, grafici, mappe, etc) coerente con protocolli e metodologie consolidate a supporto dello sviluppo e valutazione di specifici progetti o per il benchmarking tra diversi contesti.

Tabella 2.5. Principali categorie di modelli (adattata da Keirstead et al, 2013) [112].

Modello e principale focus	Caratteristiche salienti
<i>Technology design:</i> Ricercano il potenziale delle diverse tecnologie per la fornitura energetica e l'efficientamento energetico	Mostrano varie scale temporali e spaziali dipendenti dalla natura della tecnologia. Raramente la simulazione considera la domanda energetica quale parametro di input per la determinazione del potenziale. Il confronto tra soluzioni tecnologiche alternative è spesso effettuato con metodi di valutazione Multi Criteri Spaziali.
<i>Building design:</i> Simulano in maniera più meno accurata il fabbisogno energetico del patrimonio edificato principalmente in funzione delle proprie caratteristiche fisiche, ma anche considerando il fattore umano	È la categoria che mostra approcci più vari in termini di scala temporale e spaziale funzionali allo scopo del modello. I modelli sono prettamente ingegneristici, si concentrano sulla simulazione degli effetti dei miglioramenti tecnologici di involucro ed impianti e non si integrano facilmente con gli altri metodi di lettura utilizzati per lo studio del sistema urbano. La domanda energetica è l'output del modello perciò non è considerata quale parametro di input.
<i>Urban climate:</i> Sviluppano algoritmi di simulazione del fabbisogno energetico degli edifici per determinare l'impatto del calore antropogenico sul microclima urbano	La scala spaziale può essere l'intero ambito urbano per lo studio dell'isola del calore, o specificata per distretto o singola strada per lo studio dei fenomeni di microclima dei canyon urbani. Sono pochi i casi in cui il dato microclimatico è anche utilizzato per raffinare la simulazione fisica del fabbisogno energetico del patrimonio edificato.
<i>System design:</i> Utilizzano tecniche di ottimizzazione per definire la configurazione ottimale di un sistema (SMART Grid) per la fornitura energetica in funzione delle caratteristiche della domanda e di svariate tipologie di vincoli.	La scala spaziale più utilizzata è quella del distretto in quanto funzionale al progetto delle infrastrutture energetiche e più coerente con il dettaglio spaziale con cui i dati di partenza sui consumi sono noti, ma sono presenti anche modelli alla scala del singolo edificio o dell'intera città.
<i>Policy assessment:</i> Focalizzati sulla definizione e valutazione di politiche urbane di efficientamento tramite la simulazione degli assetti futuri del sistema a partire da uno scenario base.	Molti sono modelli di tipo empirico semplificati, ma possono integrare complesse tecniche di ottimizzazione o di simulazione per il confronto tra scenari alternativi di retrofitting energetico. Il riferimento spaziale più utilizzato è l'intero ambito urbano, e la scala temporale è generalmente maggiore di un anno in quanto si ricercano gli assetti futuri del sistema con orizzonti temporali di 5, 10, 25 anni.

2.3.2 Approccio per la stima del potenziale di una tecnologia di retrofit

La stima del potenziale di un miglioramento tecnologico del sistema edificio impianto o di una tecnologia per la produzione da FER alla scala urbana, non è facilmente determinabile, a causa della forte variabilità delle condizioni del contesto e della mancanza di informazioni di base. Il potenziale è condizionato dai fenomeni naturali caratterizzati da un certo grado di aleatorietà, tuttavia, così come nel caso di innovazioni tecnologiche rivolte a impianti e involucro, sono le condizioni fisiche, economiche e legislative del contesto urbano in cui esse si inseriscono a influenzarne maggiormente il valore. Gli approcci più utilizzati possono essere riconducibili a una prospettiva top down, volta a individuare tre distinti valori [115]: il potenziale teorico; il potenziale tecnico; il potenziale utilizzabile.

Potenziale Teorico

Il potenziale teorico consiste nell'energia disponibile in una data locazione ed è generalmente di molto superiore all'energia che poi sarà realmente utilizzabile. Ci sono approcci e strumenti ormai consolidati, anche integrati in piattaforme GIS [116], per la determinazione del potenziale teorico delle diverse fonti energetiche, essenzialmente basati sull'uso di modelli capaci di prevederne la disponibilità grazie alla ciclicità

dei fenomeni naturali e ad alcune condizioni specifiche del sito [115]. Le metodologie necessitano di dati di partenza differenti e possiedono definizione spaziale e accuratezza di previsione proprie, perciò il confronto tra fonti energetiche alternative spesso viene impostato tramite valutazioni qualitative e con un dettaglio spaziale definito, che riesce ad avere un dettaglio uniforme per le diverse tecnologie [117].

Potenziale Tecnico

Il potenziale tecnico è la frazione di quello teorico resa disponibile attraverso i sistemi di conversione di energia, prende in considerazione i rendimenti e le caratteristiche delle diverse soluzioni tecnologiche e alcune condizioni locali che influenzano l'accesso alla FER. Per stimare realisticamente il potenziale di molte tecnologie, si ha necessità di dati accurati sulla forma dell'edificio o sulle caratteristiche degli impianti presenti, che generalmente sono disponibili solo in sede di progetto architettonico. Le analisi alla scala urbana spesso sono basate su approcci semplificati, definiti in base alle informazioni disponibili o ricavabili con analisi spaziali effettuate in ambiente GIS. Le semplificazioni possono riguardare la morfologia urbana, spesso valutata con modelli geometrici semplificati [118], o i rendimenti e le caratteristiche della tecnologia stessa [119]. Il rendimento della tecnologia presa in considerazione non sempre è determinabile a priori, in quanto può dipendere da esigenze specifiche degli utilizzatori degli impianti o da configurazioni di rete che coinvolgono un vasto numero di utenze, come nel caso degli impianti alla scala di quartiere o urbana. Perciò le caratteristiche tecniche degli impianti vengono semplificate utilizzando coefficienti di conversione medi, generalmente fortemente cautelativi, basati sulle configurazioni impiantistiche più diffuse [120] e parametri che ne esplicitino solo gli aspetti peculiari, che ne condizionano fortemente la fattibilità, come la superficie di copertura disponibile, nel caso delle tecnologie solari, o la disponibilità di adeguati locali per lo stoccaggio del combustibile e l'alloggio dell'impianto, nel caso di impianti che necessitino di specifici locali tecnici.

Potenziale Utilizzabile

Il potenziale utilizzabile è la frazione del potenziale tecnico che può considerarsi verosimilmente disponibile, prendendo in considerazione criteri di sostenibilità legati ad aspetti economici, ambientali, gestionali e culturali. Questo potenziale è fortemente legato al contesto normativo locale che regola l'attività edificatoria e promuove le politiche incentivanti. Una tecnologia consolidata, che garantisce tempi di ritorno brevi, ma che richiede un investimento di capitale iniziale, può essere sfavorita rispetto a una tecnologia con tempi di ritorno superiori, ma che, grazie ai meccanismi di incentivazione locali e nazionali, non richiede alti investimenti iniziali. Limiti normativi locali possono interdire totalmente l'uso di una tipologia d'impianti tecnologici, come per esempio i pannelli solari nelle aree di pregio architettonico o paesaggistico, favorendo di fatto soluzioni impiantistiche altrimenti non competitive.

Le specifiche caratteristiche fisico impiantistiche dell'immobile preso in considerazione possono escludere totalmente una data tecnologia per motivi di convenienza economica o oppure favorirne altre, seppure con rendimenti teorici inferiori. L'articolazione della proprietà delle unità immobiliari presenti nello stesso edificio limita le soluzioni impiantistiche e condiziona la propensione all'investimento; lo stesso profilo dell'utenza influenza fortemente il potenziale utilizzabile: il censo, l'età media, la composizione familiare, la professione, possono influenzare fortemente la propensione personale all'investimento, limitando di fatto il potenziale di diffusione delle tecnologie rinnovabili [121].

Se in prima analisi i metodi per la determinazione del potenziale teorico alla scala urbana possono essere ritenuti consolidati e sempre più noti tra gli operatori del settore, quando si tratti di definire il potenziale tecnico, e ancor più quello utilizzabile, le metodologie assumono caratteri specifici che dipendono dai dati su cui basare l'analisi, dai risultati attesi circa scala e accuratezza della previsione e dai mezzi a disposizione per effettuarla. Passando dal potenziale teorico a quello utilizzabile le informazioni necessarie per la sua determinazione aumentano, fino a coincidere con il dettaglio richiesto per la progettazione della singola unità immobiliare. Ogni tecnologia ha il suo specifico set di dati di partenza caratterizzato da una dimensione fortemente multi scalare: per calcolare il potenziale tecnico e utilizzabile, spesso, sono necessari dati riferibili alle singole unità immobiliari ma, per impianti centralizzati o di quartiere possono assumere un ruolo rilevante le informazioni sugli edifici o le analisi a rete estese ad ampi ambiti urbani. Per analisi di scenario

volte al confronto tra le diverse soluzioni tecnologiche per fini strategici, molti studi si limitano alla determinazione dei primi due, mentre quando l'attenzione è focalizzata su aspetti specifici, come il progetto e il monitoraggio di una politica di incentivazione locale, si cerca di esplicitare il potenziale utilizzabile anche facendo ricorso a campagne di rilievo specifiche e questionari, per individuare le preferenze e le difficoltà degli utilizzatori [122]. Per effettuare il confronto tra alternative progettuali, basato su potenziali quanto più possibile vicini a quello utilizzabile, è necessario perciò strutturare un data set di partenza, su base spaziale, particolarmente complesso e di natura fortemente multi scalare, che includa anche le caratteristiche che influiscono sulla domanda energetica, altro parametro fondamentale per la valutazione della fattibilità economica di una ipotesi progettuale e per la definizione di scenari progettuali complessi. Sarà così possibile definire uno “Scenario Base” costituito dalla definizione quanto qualitativa della domanda energetica e di tutti gli elementi che la caratterizzano e la condizionano. Modificando la situazione di partenza, con la definizione di ipotesi progettuali relative al miglioramento tecnologico di impianti e involucri o l'uso della RES Technologies, si potranno definire possibili scenari complessi alternativi. La valutazione potrà essere eseguita con il semplice confronto tra indicatori di prestazione economica e ambientale, oppure con più raffinate tecniche di MCDA [123]. Lo scopo di questo lavoro non è entrare nel dettaglio delle metodologie per la stima del potenziale delle diverse tecnologie da FER, che richiedono conoscenze specifiche in diversi ambiti disciplinari, ma si vuole sottolineare come la maggior parte delle metodologie condividano i dati di partenza, sia riguardanti i dati fisici del patrimonio edificato, che riferibili al profilo degli utenti finali dei servizi energetici. I dati territoriali fanno perciò parte dei parametri di input per la stima del fabbisogno energetico e del potenziale delle tecnologie. Si delinea così la possibilità di sviluppare un approccio comune alla costruzione di una SDI (*Spatial Data Infrastructure*) tematica basata su un set comune di dati di base provvisto di algoritmi condivisi di trattamento e validazione della informazione.

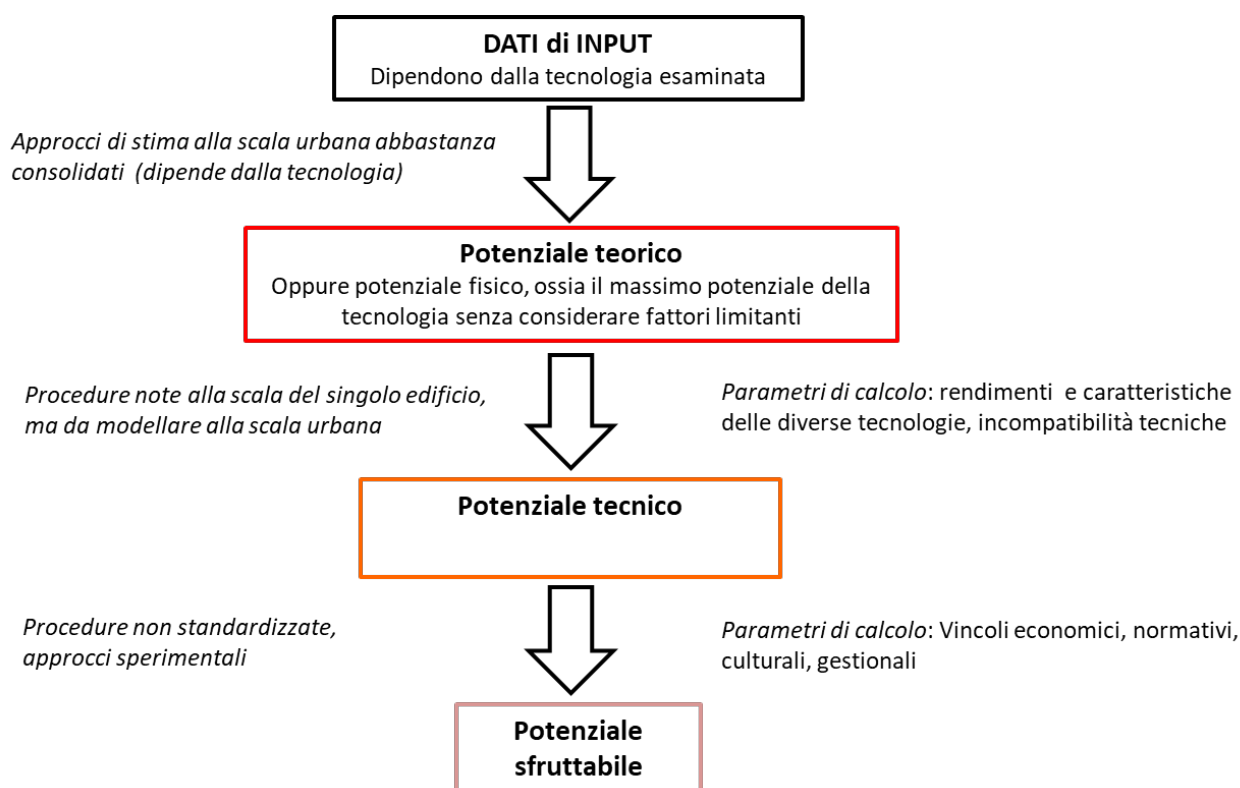


Figura 2.24. Schema approccio top down per lo studio del potenziale.

2.3.3 Approcci alla modellazione energetica

Focalizzandosi sulla modellazione energetica, la principale differenza tra i modelli in uso può essere ricondotta al tipo di approccio utilizzato: top down o bottom up.

Top down models utilize the estimate of total residential sector Energy consumption and other pertinent variables to attribute the energy consumption to characteristics of the entire housing sector. In contrast, bottom-up models calculate the energy consumption of individual or groups of houses and then extrapolate these results to represent the region or nation (Swan, 2009) [124].

In alte parole, i modelli top down partono da quantità note, aggregate per un dato territorio, e utilizzano procedure statistiche per studiarne i legami con gli elementi che la producono (parametri socio – economici, ambientali, del patrimonio immobiliare, etc), per prevederne l'andamento in futuro o suddividere tale quantità in elementi più piccoli dell'insieme.

Gli approcci bottom up, al contrario, partono dallo studio di un campione del patrimonio edilizio e, tramite appropriati algoritmi, ricavano i valori per un insieme più grande. Il tipo di approccio alla modellazione energetica determina tutta l'impostazione dello strumento, le operazioni di preparazione dei dati di base, la rappresentazione risultati e l'affidabilità degli stessi. Nello specifico gli aspetti principali da tenere in considerazione nella impostazione di un approccio di UBEM sono [113] [114] [125] [126] [127] [128] [129]:

- lo scopo dello studio che ne implica la scala e il riferimento spaziale e ne determina l'accuratezza e l'articolazione dei risultati richiesti;
- la disponibilità di dati di ingresso e i sistemi di reperimento dati che condizionano le metodologie di calcolo e determinano principalmente i costi dell'analisi;
- l'algoritmo di calcolo che cerca di ottenere i risultati attesi con limiti imposti dai dati di ingresso, mantenendo semplicità d'uso e di lettura dei risultati
- la validazione dei risultati che valuta l'affidabilità della metodologia e l'esportabilità della stessa.

Gli approcci top down, relativamente facili da sviluppare, sono basati su indicatori di tipo macroeconomico e sono largamente utilizzati per le previsioni a medio e lungo termine della domanda per la fornitura di energia. Questi modelli ben rappresentano le relazioni tra i consumi energetici del settore residenziale e le variabili socio economiche ma, oltre che non avere la possibilità di approfondire la scala dell'analisi, mal riescono a simulare gli effetti dei progressi tecnologici: essi non possono prevedere gli effetti futuri di processi che non hanno serie storiche sulle quali basare le analisi.

Gli approcci bottom up si possono essere, in base al tipo di metodologia matematica utilizzata, di estrazione statistica o di tipo ingegneristico.

Le metodologie statistiche legano con tecniche inferenziali di vario tipo i dati osservati in input di un gruppo di edifici campione con le informazioni di output desiderate. La caratteristica principale di questi modelli è che riescono a tenere conto delle abitudini comportamentali dell'utenza, ma non sono in grado di simulare le risposte del sistema a innovazioni tecnologiche, in quanto i coefficienti stimati non sono direttamente rappresentativi di grandezze fisiche o relazioni analitiche dirette.

Gli approcci ingegneristici partono dalle grandezze fisiche degli edifici e, tramite metodi analitici, calcolano i fabbisogni energetici di un gruppo campione che poi verrà generalizzato per tipologia alla scala urbana. La scelta di diversi dati di partenza porta alla strutturazione di metodologie di calcolo diverse: in generale a fronte di una forte precisione dei fenomeni fisici, si ottengono modelli con dati di input complicati e spesso difficilmente reperibili. La reperibilità di dati di adeguata accuratezza, con tempi e costi sostenibili, è un aspetto di primaria importanza: la loro disponibilità varia notevolmente a seconda dei contesti in cui si opera rendendo le metodologie non sempre direttamente esportabili. Naturalmente le metodologie applicate nei diversi casi studio presentano aspetti riferibili a più categorie, dando vita ad approcci ibridi nell'intento di sfruttare i vantaggi propri dei diversi metodi di calcolo o di mitigarne i difetti.

Nel presente lavoro l'attenzione sarà focalizzata agli approcci bottom up, che in genere offrono una migliore analisi alla scala urbana propria degli UBEM. Tra questi, più spazio verrà dato agli approcci ingegneristici o misti, che più si prestano agli scopi dello strumento. Una schedatura analitica di alcuni casi studio che

possono essere di interesse per lo sviluppo della metodologia è oggetto dell'Allegato 1 del presente report. Si riportano di seguito alcuni approfondimenti sulle diverse tipologie di approcci alla modellazione e su alcuni aspetti rilevanti nella definizione di un UBEM.

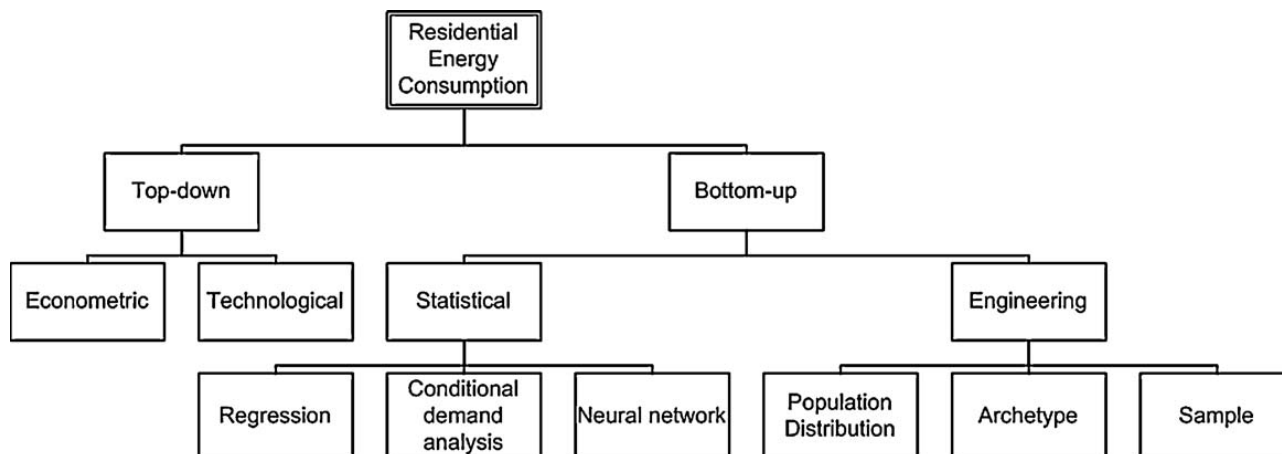


Figura 2.25. Tecniche di modellizzazione del fabbisogno del settore residenziale (SWAN 2009) [124].

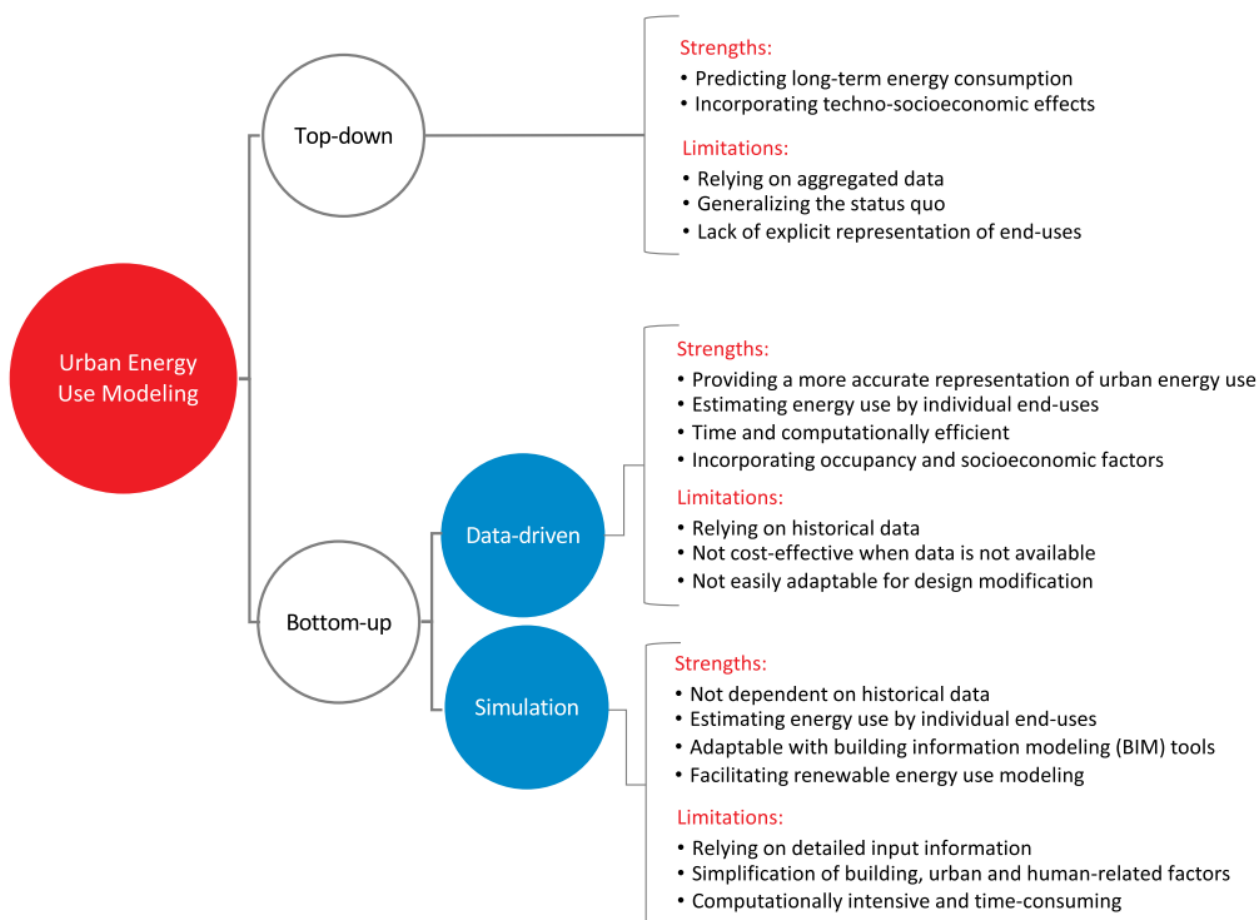


Figura 2.26. Pro e contro delle tecniche di modellizzazione [127].

2.3.3.1 Approcci statistici alla modellazione

Le metodologie statistiche legano, tramite svariati metodi di regressione e analisi stocastiche, i dati osservati reali di consumo energetico di un gruppo di edifici campione con le caratteristiche degli immobili e altre variabili di natura socio economica [130]. La caratteristica principale di questi modelli, insieme fattore di pregio e di debolezza, è che, utilizzando legami di natura inferenziale tra i consumi e le variabili descrittive del sistema, da una parte riescono a tenere conto delle abitudini comportamentali dell'utenza definendo modelli previsione molto accurati, dall'altra sono deboli nella simulazione delle risposte del sistema a innovazioni tecnologiche o politiche di incentivazione, in quanto i coefficienti stimati non sono rappresentativi di grandezze fisiche o relazioni analitiche dirette [124]. Questi metodi perciò vengono utilizzati principalmente quando lo scopo dello studio è definire con una certa accuratezza l'andamento temporale degli usi finali energetici, ossia quando si sia più interessati a ottenere un modello di previsione della domanda energetica che prescindendo dalla precisa localizzazione che essa può avere e dalle caratteristiche fisico impiantistiche che la generano. La stima della curva della domanda energetica è fondamentale per garantire il corretto rapporto tra la domanda e la fornitura di energia, sia nel progetto di impianti tradizionali della rete elettrica nazionale, che per impianti di scala inferiore alimentati da fonti rinnovabili. La previsione dei picchi di consumo giornalieri e stagionali assume un ruolo strategico nel progetto di infrastrutture energetiche di quartiere ottimizzate sulle specificità della curva di carico locale, che sono comunemente utilizzate nella impostazione delle SMART Grid [131].

Basandosi su dati reali di consumo, registrati dalle bollette dei singoli utenti o dalle società di servizi energetici, i modelli incorporano intrinsecamente la variabilità della componente umana della domanda energetica. Tale componente ha una forte influenza su alcuni fattori di consumo, che è difficile standardizzare con un utente medio, soprattutto per alcuni tipi di tecnologie come quelle per la produzione di ACS e i consumi elettrici [132]. Questi metodi, permettendo di generalizzare tramite relazioni inferenziali gli stili di consumo energetico di un campione rappresentativo di edifici o famiglie a tutto l'ambito di studio, possono essere utilizzati per ridurre i dati necessari al monitoraggio dei consumi reali e facilitare la misura della efficacia di politiche e programmi sia rivolti alla parte fisica impiantistica della città, che alla sensibilizzazione dei cittadini.

I limiti intrinseci dell'approccio statistico stanno nelle caratteristiche dei dati di partenza: sia quelli relativi ai consumi che le variabili socio economiche, su cui si basano le analisi, sono noti per ambiti spaziali di dettaglio molto inferiore a quello dell'edificio e perciò il modello difficilmente riesce a legare i consumi previsti con gli edifici che li generano. Altra limitazione può essere la dinamicità del dato di partenza: per calibrare il modello e ottenere previsioni sempre più attendibili è necessario confrontare i risultati con dati di consumo registrati con una elevata cadenza temporale, ma non sempre questo è possibile; inoltre anche i dati socio economici su cui essi si basano spesso mancano della dovuta dinamicità, in quanto sono noti solo grazie a censimenti ufficiali o specifiche campagne di sondaggi e questionari, per i quali non sono possibili aggiornamenti frequenti.

I dati di consumo di alcuni vettori energetici ricomprendono poi usi energetici molto diversi. I consumi elettrici sono caratterizzati da una forte variabilità perché, a seconda degli impianti presenti nell'edificio, si riferiscono a usi per l'illuminazione e gli elettrodomestici, ma anche per la climatizzazione estiva e invernale e la produzione di ACS. Ciò accade, anche se con fenomeni gravati da una minore variabilità, anche nel consumo dei combustibili che generalmente sono utilizzati per il riscaldamento, ma talvolta producono anche ACS e vengono utilizzati per la preparazione degli alimenti. Tuttavia vi sono molte esperienze che, definendo profili tipologici di utenza e di edifici, utilizzano alcuni dati noti con maggiore dettaglio spaziale per ottenere modelli con risoluzione spaziale sub urbana capaci di esplicitare il peso dei consumi relativi a usi energetici definiti anche con grande dettaglio.

Il recupero delle informazioni di partenza dai data base ufficiali, i rilievi necessari per la definizione tipologica dell'utenza e degli edifici, così come le variabili che permettono la generalizzazione a scala urbana del campione, sono fortemente dipendenti dal contesto analizzato e costituiscono i costi maggiori dello studio. Gli enti gestori delle reti di distribuzione di energia possiedono sistemi per la contabilizzazione dei consumi

in base ai quali gli utenti devono pagare le bollette. Tuttavia molti di essi non sono monitorati in tempo reale: le bollette vengono pagate in base allo storico dei consumi dell'utenza e poi conguagliati su letture che avvengono con intervalli temporali anche annuali, altri, come la rete elettrica, pur misurando con continuità il consumo, non sempre possiedono sistemi informatici capaci di effettuare con semplicità query e selezioni su dati disaggregati e geo-riferiti. L'aggiornamento e l'implementazione delle reti di distribuzione è già in atto, ma incontra spesso limitazioni date dalle normative di tutela dei dati personali, inoltre una quota non trascurabile degli usi finali di combustibile viene distribuito da imprese private di auto trasporto e vendita che riforniscono le zone non servite dalle reti urbane. Tali imprese, spesso di piccola dimensione, pur mantenendo una rigorosa contabilità delle loro vendite e dei loro clienti, non sempre possiedono i sistemi informatici che permettono una facile consultazione e le adeguate caratteristiche di interoperabilità.

Lo sforzo attuale della ricerca è indirizzato verso lo sviluppo di metodologie efficaci ed economiche di misura e rendicontazione dei consumi alla scala dell'utente finale (Micro DATA) dei diversi vettori energetici, ma anche di acqua e rifiuti, tramite reti di sensori integrati con data base in cloud di natura multi disciplinare [133]. Spesso i modelli statistici per la stima della domanda di carico svolgono un ruolo fondamentale nelle SMART Grid per l'ottimizzazione tra domanda e produzione energetica locale o centralizzata. Le SMART Grid ottimizzano la domanda e la fornitura energetica tramite Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione (ITC) che integrano sistemi, prodotti e servizi innovativi per la generazione, la trasmissione e la distribuzione dell'energia utilizzando svariate tipologie di sensori e sistemi di controllo e comunicazione.

La ricerca si concentra molto sullo studio di efficaci sistemi di monitoraggio e controllo dei consumi e sulla definizione di raffinate metodologie di ottimizzazione, tuttavia la rete è caratterizzata da una non trascurabile dimensione sociale: essa genera un nuovo tipo di utente energetico informato, capace di influire direttamente sul sistema di fornitura energetica con le proprie scelte di consumo e il proprio feedback ribaltando la prospettiva top down della pianificazione energetica tradizionale [134]. Per quanto la tecnologia di "SMART metering" sia da ritenersi già disponibile, la sua implementazione generalizzata sembra ancora difficile per i costi e la limitata interoperabilità e completezza dei data base ufficiali; inoltre la raccolta e la condivisione di micro dati sui consumi energetici solleva ancora riserve circa le necessità di tutela della privacy individuale [135]. La maggior parte degli esempi riguardano complessi di edifici prevalentemente di nuova costruzione o oggetto di forti investimenti pubblici [3] oppure contesti dove, per condizioni locali particolarmente favorevoli, si siano già sviluppati sistemi di monitoraggio dei consumi energetici efficienti e completi per tutto il territorio [136].

Sebbene alcuni studi dimostrino che il monitoraggio in tempo reale dei consumi da parte degli utenti finali possa generare comportamenti adattivi capaci di considerevoli economie tra 5-15% [137], è proprio la dimensione umana della SMART Grid a essere suo il principale limite. Il presupposto di base è un "utente razionale" che volontariamente sia disposto a cambiare le proprie abitudini, condividere informazioni sui propri stili di consumo e, più in generale, a dare un contributo attivo al processo rigenerazione urbana. Il centro del problema è lo sviluppo di una interfaccia utente capace di stimolare il feedback e il comportamento adattivo quotidiano [138]. Oltre alla raccolta della serie storica dei consumi, articolata per attività e confrontabile con alcuni livelli di riferimento, l'interfaccia dovrebbe diventare un canale privilegiato per formare un utente consapevole e stimolare la partecipazione allargata [140] anche tramite sistemi di premi e penalità e tecniche di gioco [139].

Le applicazioni sviluppate rendono evidente che, in un prossimo futuro, l'integrazione tra queste tecnologie e gli approcci statistici potrebbero definire modelli di generazione molto accurati in base a dati dinamici e con una eccezionale risoluzione spaziale. Un'interessante prospettiva è proprio l'integrazione del dato ufficiale o del dato misurato tramite sensori con informazioni ottenute dal contributo volontario dell'utente del servizio energetico. Le metodologie di eco-feedback contribuiscono a informare e sensibilizzare la cittadinanza verso stili di consumo più responsabili e possono essere una fonte preziosa di dati per la definizione dei modelli di domanda energetica sia per quanto riguarda i consumi che le tipologie di impianti presenti [140].

2.3.3.2 Modelli analitici ingegneristici

Gli approcci ingegneristici partono dalle grandezze fisiche degli edifici e, tramite metodi analitici, simulano i fabbisogni energetici del patrimonio edificato esplicitando l'influenza dei diversi fattori che contribuiscono alla sua determinazione (tabella 2.6). L'uso di modelli analitici diventa fondamentale per la valutazione *ex ante* degli effetti delle innovazioni tecnologiche sui consumi energetici e per le analisi di fattibilità tecnica ed economica degli interventi riguardanti l'involucro e gli impianti. Questi modelli possono essere sviluppati anche senza un adeguato data base storico dei consumi, che spesso è il limite degli approcci statistici; inoltre il fabbisogno energetico è generalmente l'output della simulazione. Il controllo dei parametri che generano il fabbisogno permette di intervenire su essi per simulare le innovazioni tecnologie o per simulare anche gli effetti di altri fenomeni esterni al calcolo stesso. Nella pratica gli approcci analitici sono spesso da considerarsi misti: molte metodologie combinano procedure analitiche con tecniche statistiche per la generalizzazione dei risultati all'interno patrimonio edilizio. Si possono individuare i seguenti approcci al calcolo [124] [129]:

- I. L'approccio *totalmente archetipale* definisce dei tipi ideali sulla base di attività di studio del patrimonio edilizio, poi tramite dei valori chiave si applicano degli algoritmi (più o meno complessi) per riportare i valori definiti per tipo su tutto il patrimonio edilizio;
- II. L'approccio a *campione* si basa sullo studio di un gruppo di edifici che può essere effettuato anche in maniera molto dettagliata, che poi verrà generalizzato alla scala urbana con metodi statistici e/o analitici partendo dall'approccio tipologico impostato;
- III. L'approccio a *distribuzione della popolazione* richiede un vasto numero di osservazioni e poi riporta i risultati per tutto il patrimonio con metodi prevalentemente statistici partendo dall'approccio tipologico impostato;
- IV. L'approccio *totalmente simulato* (brute force) adotta un modello di calcolo che utilizza relazioni analitiche più o meno semplificate basate su dati disponibili per tutto il patrimonio ed effettua il calcolo per tutti gli edifici.

La scelta tra gli approcci dipende dalla disponibilità di dati di partenza e dalle risorse disponibili. Il vincolo maggiore di questi modelli è il reperimento dei dati iniziali col dettaglio informativo necessario alla esecuzione della metodologia e che garantisce l'affidabilità dei risultati e la facilità d'uso.

I maggiori punti di debolezza di questi metodi sono la raccolta e il pre processamento dei dati iniziali, i tempi di calcolo, l'affidabilità dei risultati. Più si adottano modelli energetici complessi, più crescono i dati di ingresso necessari e le operazioni di pre processing che possono generare alti costi, soprattutto per ambiti urbani estesi. Per questo motivo si adottano approcci semplificati per tipo o valori mediati, che tuttavia hanno un impatto notevole sull'affidabilità della procedura. Il trattamento di molti dati di ingresso e le simulazioni energetiche, specie quelle dinamiche svolte per ogni edificio dell'area di studio, possono generare forti carichi computazionali che possono rendere difficile l'utilizzo dello strumento. Il punto più critico è probabilmente validare le procedure e definire che grado di affidabilità la procedura possa garantire nella simulazione energetica e nella conseguente stima dei consumi. È noto che anche le simulazioni svolte sulle singole unità immobiliari, sulla base di accurata conoscenza del sistema edificio – impianto, necessitano di operazioni di calibrazione, al fine di simulare con una certa accuratezza gli andamenti dei consumi reali. Spostandoci a scala urbana gli elementi di incertezza aumentano notevolmente: si introducono semplificazioni per tipo basate su valori medi, che non possono necessariamente corrispondere ai dati ricavabili da un sopralluogo in una singola unità immobiliare: per effettuare la calibrazione del modello si hanno generalmente a disposizione solo dati di consumo aggregati per parti di città, ma anche arrivando a un buon grado di risposta alla scala aggregata, nel singolo edificio le differenze possono essere enormi.

Sono comunemente in uso numerosi modelli di calcolo e software dedicati alla simulazione energetica degli edifici (Building Energy Modeling - BEM): alcuni effettuano dettagliate simulazioni fisiche basate su modelli dinamici orari (EnergyPlus, TRNSYS, etc), altri utilizzano metodi semplificati semi stazionari (ISO EN 13750: 2008, UNI TS 11300 per l'Italia) o dinamici (UNI ISO 52016-17), che sono generalmente adottati dalle normative. Per quanto siano caratterizzati da diversa complessità, entrambi i metodi richiedono un insieme

piuttosto articolato di dati di ingresso, che non è possibile reperire per ogni unità immobiliare del contesto urbano: il clima, le caratteristiche del contesto, la geometria e i materiali dell'involucro, la distribuzione degli spazi interni dell'edificio, gli impianti tecnologici, i comportamenti umani (tabella 1.6). Inoltre l'esecuzione massiva di calcoli di dettaglio per l'intero patrimonio edilizio può aumentare notevolmente il tempo di calcolo, rendendo di fatto difficile l'utilizzo dello strumento.

Considerando che anche le pratiche correnti e le normative tecniche per la progettazione impiantistica e architettonica della singola unità immobiliare utilizzano diverse metodologie di calcolo, in funzione dei dati di partenza disponibili e dell'accuratezza richiesta ai risultati (es: calcolo standard di progetto e Tailored della UNI 11330), è naturale che spostando il focus ad ambiti di studio più ampi sia necessario definire nuove metodologie coerenti con i dati, i mezzi disponibili e le finalità dello studio. Sono perciò ampiamente in uso approcci semplificati, volti sia a colmare le lacune dei dati di ingresso che ad adattare le procedure di calcolo nell'intento di arrivare a risultati significativi nell'ambito delle risorse messe a disposizione. Tali tecniche sono molto varie e possono interessare tutti gli elementi e i fattori che influenzano la simulazione energetica dell'edificio. Un approccio ampiamente utilizzato si basa sui fattori ricorrenti del patrimonio immobiliare proponendo valori mediati o fattori tipologici (archetipi) [124].

I dati climatici sono caratterizzati dalla ciclicità tipica dei fenomeni meteorologici. I valori di principale interesse sono la temperatura esterna e i valori di irraggiamento solare: i modelli di simulazione fisica dinamica utilizzano gli andamenti climatici statisticamente più probabili, specificati con articolazione temporale oraria o superiore, mentre, con intento semplificativo, alcune normative nazionali adottano valori medi mensili. In entrambi i casi, il valore fornito è comunque quello più probabile in base alle serie storiche dei valori osservati, perciò i valori reali di temperatura, che in parte influenzano i consumi, differiranno sempre da quelli calcolati soprattutto in presenza di eventi climatici con caratteristiche eccezionali. Considerando però archi temporali maggiori, come la stagione o l'anno solare, l'influenza della variabilità del clima sul totale dei consumi energetici è molto limitata e l'utilizzo di un profilo mensile degli andamenti climatici è largamente considerato sufficiente per un audit energetico semplificato dell'unità immobiliare, mentre una modellazione più accurata può essere utile per la previsione dei fenomeni di picco di consumo relazionati al dimensionamento degli impianti tecnologici o lo studio del comfort interno. Nello sviluppo delle SMART Grid, per esempio, si progettano sistemi capaci di adattarsi in tempo reale al mutare delle condizioni climatiche in modo da ottimizzare i consumi dei sistemi di fornitura energetica locale [3]

Le caratteristiche del contesto influenzano principalmente la componente del bilancio energetico dell'edificio relativa ai guadagni termici solari e al fabbisogno per illuminazione [141]. Gli ostacoli esterni all'edificio generano ombre sullo stesso, limitando gli apporti solari diretti, e le caratteristiche di albedo circostanti influenzano la radiazione indiretta. Partendo dalle caratteristiche climatiche locali di irraggiamento, i modelli di trasposizione solare calcolano l'energia incidente su superfici variamente inclinate e orientate, tenendo in considerazione la morfologia e i materiali che costituiscono l'ambiente circostante [142]. I modelli ingegneristici a scala urbana e alcune metodologie analitiche, adottate nelle normative tecniche nazionali, valutano l'ombreggiamento con coefficienti standard semplificati rispetto ai modelli fisici di trasposizione solare, ma recenti esperienze, basate sul rilievo geometrico ad alta risoluzione ricavato con tecnologie LiDAR, hanno reso possibile l'utilizzo di algoritmi molto precisi, implementati in software specifici anche integrati in ambiente GIS [143].

In ambito urbano le condizioni di irraggiamento e ventilazione locale possono influire fortemente anche sulle temperature medie stagionali, generando i fenomeni noti come *l'isola del calore* e i *canyon urbani* [144]. Gli approcci di calcolo semplificati generalmente non tengono in considerazione questi ultimi fattori [145] [146], ma recenti esperienze hanno dimostrato che è possibile definire questi aspetti anche con metodi semplificati capaci di integrarsi con altri layer informativi in ambito urbano, in modo da fornire informazioni utili per il progetto delle trasformazioni urbane [147].

I materiali e la geometria dell'involucro sono, insieme al rendimento degli impianti, gli elementi che influenzano maggiormente il bilancio energetico dell'edificio. Più la forma dell'edificio è compatta, minori sono le superfici disperdenti verso l'esterno attraverso le quali avviene lo scambio termico tra la zona

riscaldata e l'ambiente. Seppure lontani dal dettaglio di un calcolo analitico fisico alla scala della singola unità immobiliare, i dati disponibili alla scala territoriale e le moderne tecnologie per il rilievo topografico permettono di ricavare con un buon dettaglio la geometria delle superfici disperdenti, ma per quanto riguarda i materiali che costituiscono l'involucro non si può che ricadere su tipizzazioni e semplificazioni più o meno arbitrarie. La stessa normativa, nel caso di valutazione energetica semplificata, suggerisce l'utilizzo di abachi di strutture edilizie, classificate per tipologie costruttive e anno di costruzione, e propone la valutazione forfettaria dell'influenza dei ponti termici in luogo di costose attività di rilievo sulle strutture.

Nei modelli a scala urbana la distribuzione degli spazi interni e le attività che in essi si svolgono vengono spesso ignorate o valutate tramite approcci tipologici semplificati. Una semplificazione molto utilizzata è considerare le unità immobiliari appartenenti allo stesso edificio come una singola zona termica [145] [146], oppure ipotizzare delle distribuzioni planimetriche in funzione della tipologia edilizia presa in esame [148]. Nei climi freddi, dove generalmente tutti gli ambienti degli edifici sono riscaldati, ciò non porta a grandi errori di stima del fabbisogno, ma nelle zone a clima temperato vi sono molti ambienti dei corpi di fabbrica che non vengono climatizzati (come vani scala o le autorimesse) che potrebbero generare errori di valutazione non trascurabili. La conoscenza delle distribuzioni interne in funzione della posizione delle superfici finestrate è molto importante anche per la stima del fabbisogno energetico per illuminazione: nei modelli a scala urbana vengono utilizzati approcci semplificati, basati sulla forma degli involucri esterni e distribuzioni planimetriche tipologiche [149].

I rendimenti degli impianti per la climatizzazione e la produzione di ACS sono difficili da definire a priori, in quanto esiste una grande varietà di soluzioni tecnologiche e la loro efficienza dipende anche dalle condizioni di esercizio, dal clima, dalle preferenze degli utenti e dallo stato di manutenzione. Sebbene sia possibile definire un range verosimile di rendimento, in base alle tipologie di impianto e ad alcune caratteristiche di installazione e regolazione (ISO EN 13750: 2008), è molto difficile trovare dei data base ufficiali completi e affidabili a livello urbano sui quali impostare delle ipotesi valide. Definire tipologie di impianto, in funzione del tipo di edificio e del suo anno di costruzione, può essere possibile solo in alcuni contesti caratterizzati da forte omogeneità, ma in generale la componente impiantistica ha una vita utile inferiore a quella di struttura e involucro e perciò va incontro a fenomeni di sostituzione dei quali non sempre esiste traccia. I modelli analitici per il calcolo del fabbisogno alla scala urbana, salvo che lo scopo non sia rivolto allo studio della fattibilità tecnica o economica di una specifica soluzione tecnologica, di solito semplificano la parte impiantistica con un rendimento medio del sistema nel suo complesso [145], in modo da favorire il confronto tra tecnologie alternative, che possono differire notevolmente nelle loro rispettive potenzialità, e limiti di utilizzo.

L'utilizzo di un profilo di "utente medio", specie se definito con intenti chiaramente cautelativi, è per la maggior parte dei casi accettabile nel calcolo del fabbisogno alla scala della singola unità immobiliare o dell'edificio, ma con l'aumentare degli edifici considerati l'approssimazione che introduce potrebbe portare a errori di stima non accettabili nel progetto delle infrastrutture energetiche alla scala urbana o distrettuale. Si è già discusso su come i metodi statistici, basati sulla raccolta di dati reali di consumo, siano i più adatti a rappresentare gli andamenti degli usi finali energetici, ma per esplicitare il peso che le abitudini di consumo locali o una data tipologia di utenti possono avere sull'intero bilancio energetico, è necessario metterli a confronto con un livello medio dei consumi o con un consumo teorico calcolato analiticamente in base a profili comportamentali standard. L'uso di articolati profili di "utente medio", basati su più o meno vaste campagne di rilevazione, può facilitare la definizione e valutazione di politiche di educazione e la sensibilizzazione della popolazione, redigendo politiche per una tipologia specifica di utenti e valutando l'efficacia di una stessa politica in diversi gruppi sociali [147] [150].

Tabella 2.6. Fattori che influenzano la simulazione energetica di un edificio.

Elementi	Fattori che possono influenzare la simulazione
Clima	Temperature orarie e medie, Irraggiamento solare, Umidità Relativa, Ventilazione
Contesto	Ombreggiamento, Irraggiamento diretto ed indiretto, Microclima urbano
Geometria involucro	Superfici disperdenti (interne, esterne, contro terra) Volume e superficie riscaldata Distribuzione interna
Materiali involucro	Caratteristiche termofisiche delle strutture e dei materiali (coperture, muri esterni, chiusura di base, finestre) Ponti termici
Impianti	Rendimenti stagionali medi, rendimenti sottosistemi, Caratteristiche tecniche (potenza emessa, potenze assorbite, transitori, perdite, etc) Vettore energetico
Fattore umano	Programmazione impianti Uso dei sistemi di illuminazione Uso schermature mobili Ventilazione e guadagni di calore interno Microclima interno

Il recente aumento delle capacità di calcolo dei computer e la diffusione delle tecniche di *cloud computing* ha permesso lo sviluppo di alcuni strumenti (CityBES [151], UMI [152]), basati sulla integrazione di un approccio simulativo svolto per ogni edificio dell'area di studio generalmente impostato su motori di calcolo dinamico, con tecniche di tipo statistico per la trattazione dei dati di consumo disponibili per la fase di calibrazione e validazione del modello [153]. Questo tipo di approccio misto cerca di sopperire ai principali punti di debolezza dei modelli simulativi e dei modelli statistici puntando fortemente sulla fase di calibrazione del modello. Il modello statistico viene usato per fare ciò che sa far meglio, cioè stimare i consumi tenendo in considerazione la componente umana e la variabilità statistica del campione. A tal fine vengono utilizzati dati di consumo aggregato per ampie parti di città e/o dati di consumo reali rilevati su un campione tramite diverse metodologie: il dettaglio spaziale raggiungibile dal modello statistico dipende dalla granularità dei dati di ingresso posseduti. Il modello analitico, seppure meno capace di simulare l'andamento reale dei consumi, diventa fondamentale per la simulazione di scenari progettuali e, talvolta, per aumentare il dettaglio spaziale. Il risultato di fabbisogno simulato viene poi accuratamente calibrato e validato con il risultato del modello statistico tramite tecniche di vario tipo, che vanno dalla modifica manuale dei dati input basata alla esperienza degli operatori, allo sviluppo di metodi semi automatici basati su algoritmi di ottimizzazione. La fase di calibrazione è cruciale in quanto riduce l'errore del modello simulativo analitico, facendolo diventare più rappresentativo del contesto reale, riducendo gli errori generati dalle assunzioni effettuate nell'impostazione dei dati di ingresso e dalle semplificazioni del modello di calcolo stesso. Ciò permette anche di limitare la fase di indagine e rilievo urbano necessaria alla impostazione degli archetipi che stanno alla base del modello analitico, in quanto gli errori introdotti dalle semplificazioni iniziali saranno limitati dalla procedura di calibrazione. Alcuni degli approcci più recenti, che puntano ad automatizzare il più possibile le procedure legate allo sviluppo dell'UBEM, pur sviluppando modelli energetici molto dettagliati basati su motori di calcolo dinamici eseguiti per ogni edificio, adottano tipizzazioni delle caratteristiche del sistema edificio - impianto molto semplici, lasciando alla fase successiva di calibrazione l'onere di migliorare la rappresentatività del modello.

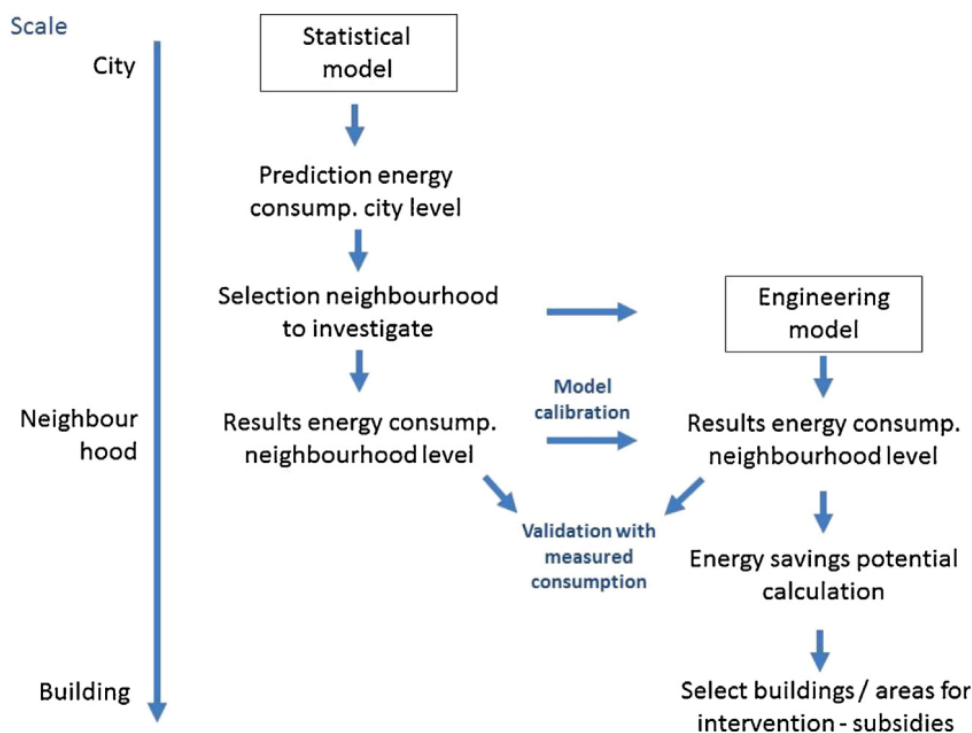


Figura 2.27. Esempio di approccio misto e ruolo della calibrazione (tratto da [153]).

2.3.4 Dati di ingresso

I dati di ingresso necessari a un UDEM dipendono dagli scopi del modello, che possono essere piuttosto vari e riguardare aspetti di diversa natura, non direttamente legati alla modellazione energetica dell'edificio. Lo studio dei dati di ingresso disponibili è il primo step dopo l'individuazione dello scopo dello strumento. Essi naturalmente condizionano il tipo di dettaglio spaziale sviluppabile e contribuiscono a definire i contenuti degli approcci tipologici da sviluppare, inoltre possono modificare anche gli scopi stessi dello strumento, che possono non essere congruenti con le risorse disponibili per lo studio. I dati di base sono solitamente sottoposti a delle attività di preparazione, modifica e arricchimento delle informazioni al fine di ottenere i dati input corretti per la modellazione energetica e per i fini generali dello strumento. Questa fase di pre processing può anche comprendere eventuali attività di rilievo diretto di informazioni, o l'esecuzione di algoritmi, più o meno complessi, esterni alla vera e propria modellazione energetica, per ricavare indirettamente dei dati mancanti. Perciò è importante impostare procedure di UDEM che possano arrivare a un risultato con un livello minimo di dati di partenza, comunemente disponibili per il territorio considerato. Naturalmente, studi specifici possono sempre essere sviluppati qualora lo si ritenga opportuno e le risorse lo permettano, tenendo sempre conto che maggiore è la specificità dei dati di base e la complessità delle procedure, minore è l'esportabilità della metodologia.

Limitandosi al modello di calcolo energetico dell'edificio, si possono individuare le seguenti categorie di dati di ingresso [124] [108]:

- clima;
- dati topografici (geometrie degli edifici e contesto);
- dati spaziali disponibili sugli edifici (strutture, impianti, ristrutturazioni, etc);
- dati sui consumi energetici;
- informazioni non spaziali e conoscenza di sfondo (materiali, tecnologie, archetipi, profili d'uso);
- attività di rilievo specifiche.

Il dato relativo al clima comprende le informazioni di base per il calcolo energetico e con esso deve essere congruente. Per questo tipo di dato di ingresso esistono degli standard abbastanza consolidati, che si

differenziano principalmente in funzione del dettaglio temporale del modello energetico: dati orari o con maggiore dettaglio per i calcoli dinamici (Meteonorm) [154], dati mensili per i più semplici calcoli semi stazionari anche provenienti da profili normativi. Alcune metodologie inoltre introducono delle valutazioni personalizzate del dato climatico in ingresso al modello energetico.

L'altra grande famiglia di dati di ingresso è quella dei dati geografici, ossia provvisti di una dimensione spaziale della informazione adatta allo strumento. La principale tipologia è costituita dai dati topografici, che descrivono le geometrie degli edifici e degli elementi del contesto. Il recente inquadramento disciplinare degli approcci allo sviluppo degli UBEI individua, come dato spaziale minimo necessario ai modelli di calcolo, un file che permette di individuare spazialmente le scatole edilizie (impronta dell'edificio, quota di attacco al suolo, quota della gronda), comunemente chiamato CityBOX model (LoD – Level of Detail - 1): esso è il dato minimo che permette di calcolare i volumi climatizzati ed eventualmente integrare nella simulazione gli effetti del contesto. Tale dato di ingresso può essere ritenuto disponibile per la maggior parte dei centri urbani, in quanto può essere ricavato tramite semplici attività di pre processing (CAD – GIS) condotte su base topografica, generalmente disponibile anche per i centri urbani minori in quanto comunemente utilizzate per le attività di pianificazione urbana e di gestione dell'attività edificatoria. Le footprint degli edifici estratte dalle basi topografiche possono non contenere informazioni sulle quote (di gronda e di base), richiedendo perciò alcune attività di editing CAD per ottenere un City BOX model. La quota di base può essere ottenuta interpolando i punti quotati della mappa attraverso un Modello Digitale del Terreno (DTM – Raster 2.5d), con passo di precisione consono alle finalità dello studio (GRID 1x1m, o superiore). Il DTM sarà poi utilizzato per ricavare la quota di base dei corpi di fabbrica come media dei punti ricadenti nella footprint. In caso di mancanza delle quote di gronda, è necessario provvedere all'immissione manuale di nuovi dati: la maniera più semplice è assegnare il numero di livelli fuori terra a ogni corpo di fabbrica tramite input manuale, e poi ricavare la quota della gronda e l'altezza dell'edificio sulla base della l'altezza dell'interpiano definita negli archetipi. Naturalmente, in caso di maggiore disponibilità di risorse, i corpi di fabbrica possono essere ricavati tramite operazioni di post processing di un rilievo LiDAR, o dalla produzione di cartografia tradizionale di maggiore dettaglio, generalmente sviluppata in caso di pianificazione particolareggiata (scala 1:1000, 1:500) coerente con gli Standard INSIPRE [155].

Esiste una certa varietà nel tipo e nel dettaglio dei dati spaziali riferiti al patrimonio edilizio. Alcune metodologie adottano dettagli spaziali inferiori al singolo corpo di fabbrica: certe riportano i volumi edilizi su griglie raster di diverso passo, altri usano dati statistici riferiti ad ambiti più ampi. La letteratura riporta anche una gran quantità di approcci che si basano su modelli dettagliati ricavati da rilievi LiDAR e Laser scanner terrestri [156], che possono comprendere la forma delle coperture, gli elementi architettonici e altri elementi del contesto che influenzano l'irraggiamento solare e il microclima locale. Tali dati di ingresso sono generalmente legati a procedure che adottano modelli di calcolo energetico più dettagliati e supportano anche altri tipo di studi del contesto urbano. Questi approcci sono sicuramente caratterizzati da maggiore affidabilità dei risultati, tuttavia possono richiedere ingenti risorse per il rilievo e il post processing dei dati; al contrario procedure basate su dati di input geometrici più semplici possono considerarsi alla portata di cittadine di medie o piccola dimensione.

La definizione di procedure standard per la qualità e la gestione dei dati geografici utilizzabili per la modellazione del patrimonio edilizio alla scala urbana è al centro di una interessante dibattito scientifico che riguarda l'individuazione dei livelli standard di dettaglio (LoD) per la rappresentazione del contesto urbano. Esistono diversi modelli standard che sono orientati allo sviluppo di protocolli per l'interscambio di dati, l'integrazione tra strumenti GIS e BIM [157], di algoritmi automatici per la costruzione dei modelli multi fisici urbani [158] [159]. Uno dei più utilizzati è quello dell'Open Geographic Consortium (OGC), articolato su cinque livelli principali (figura 2.28) e orientato allo sviluppo di modelli vettoriali semantici per il web, anche se ne esistono altri più adatti ad altri scopi [160]:

- LoD 0, modello raster con footprint dell'edificio;
- LoD 1, footprint con le altezze (City Box Model);
- LoD 2, integra la forma delle coperture alcuni autori integrano anche altri elementi accessori;
- LoD 3, inserimento di finestre ed altri particolari architettonici esterni
- LoD 4, informazioni interne all'edificio.

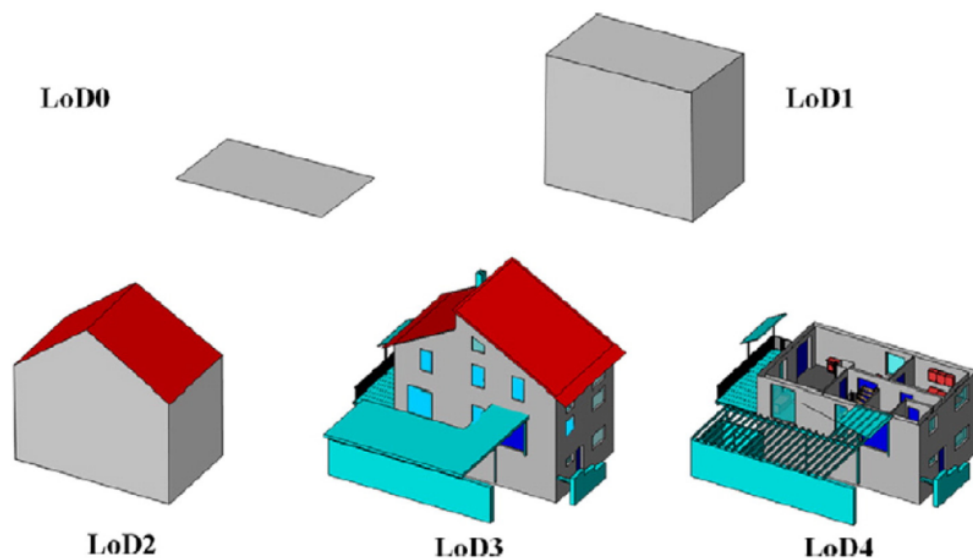


Figura 2.28. Rappresentazione dei LoD del 3D CityGML (OGC) [161].

Ai dati spaziali topografici si possono aggiungere altre tipologie di dati spaziali, utili per lo sviluppo dell'UBEM, legati agli scopi generali o direttamente inseribili nel modello energetico. Nel primo caso possono essere dati spaziali che influiscono sui potenziali di retrofit (regolamenti urbanistici, vincoli paesaggistici, etc) generalmente provenienti da altre SDI spaziali. Nel secondo caso possono essere informazioni su dati di ingresso direttamente coinvolti della modellazione energetica, come ad esempio: data base degli impianti termici, dati socio economici sui residenti, data base sulle ristrutturazioni edilizie e sugli impianti FER o altre tipologie. La particolarità di questo tipo di dati spaziali è che possono avere diverso dettaglio geografico non sempre coerente, che spesso richiede operazioni di pre processing o attività di rilievo.

Possono essere considerati come dati da pre processing anche i dati sui consumi energetici, in quanto non sempre sono noti con completezza, nè con risoluzione spaziale e temporale coerente con la modellazione energetica. In generale essi sono noti in maniera aggregata per una parte di territorio più o meno ampia. In alcuni casi possono essere noti con un dettaglio maggiore, come nel caso dei consumi dei vettori energetici forniti dalle reti di distribuzione urbane, dove il dato, più o meno dinamico, può essere legato direttamente al civico o, per tutelare la privacy, a isolati o gruppi di edifici. In alcune esperienze si fa uso di dati più dettagliati rilevati su gruppi di edifici, tramite sistemi di SMART metering o tecniche speditive di audit, da sottoporre a tecniche statistiche inferenziali per ottenere i valori necessari alla modellazione energetica.

Le informazioni di tipo non spaziale sono quelle prevalentemente riferite alla conoscenza di sfondo e allo studio del patrimonio edilizio locale, che poi guida nella impostazione degli approcci semplificativi per tipo e delle attività di rilievo. Queste possono essere finalizzate a studiare un campione di edifici, al fine di impostare degli appropriati approcci tipologici, oppure finalizzate a colmare qualche dato mancante su tutto l'ambito di studio, tramite attività speditive di rilievo esterno e input più o meno automatizzato.

2.3.5 Dimensione spaziale

In questo contesto la dimensione spaziale acquisisce una rilevanza che esula della mera accuratezza del calcolo fisico del fabbisogno energetico. Dalla prospettiva del singolo edificio, la localizzazione geografica, l'orientamento nello spazio e le caratteristiche del contesto sono funzionali al solo calcolo dei parametri che influenzano le prestazioni energetiche, ma considerando l'edificio inserito nell'ecosistema urbano complesso, esso dovrà relazionarsi con la regolamentazione dell'attività edificatoria e la complessità delle istanze che guidano i processi di trasformazione urbana, spesso più legate ad aspetti che esulano dalla mera ottimizzazione tecnica tra involucro e impianti, quali la tutela del paesaggio, i diritti di proprietà e le opportunità di sviluppo economico e sociale.

La definizione attuativa di programmi di riqualificazione o recupero urbano necessita di riconoscere le

peculiarità dei singoli corpi di fabbrica, in modo da redigere programmi efficaci e specifici: si individuano edifici di pregio o strategici sui quali apporre vincoli alla trasformazione e all'uso e si promuove la sostituzione di altri con premi volumetrici, riduzioni negli oneri urbanistici o l'inserimento di funzioni più pregiate. In quest'ottica anche la definizione di efficaci politiche o programmi per l'efficienza energetica, specie se rivolti alla parte fisica dell'edificio o alla diffusione delle tecnologie per produzione energetica da FER, hanno la necessità di esplicitare le differenze che intercorrono tra le diverse parti della città alla scala del progetto urbano, che permetta di ricavare quanto più possibile il potenziale tecnico in luogo di quello teorico.

La pianificazione urbana fa largo uso di layer tematici georeferenziati, che esplicitano le peculiarità delle diverse parti di città, tramite lo zoning dei piani urbanistici municipali, le regole dell'attività edificatoria e i vincoli di natura ambientale o paesaggistica, perciò la struttura della conoscenza orientata ai processi di retrofitting energetico deve potersi relazionare con gli strumenti di governo del territorio. La sempre maggiore diffusione di sistemi IOT e SMART Meter sta rendendo disponibili anche micro dati legati alla dimensione spaziale della singola unità immobiliare o anche a uno specifico ambiente della stessa. La struttura multi scala della conoscenza facilita la sua integrazione multi disciplinare con gli altri tematismi, propri del governo delle trasformazioni urbane come layers conoscitivi di tipo sociale, ambientale paesaggistico, in maniera funzionale alla riqualificazione energetica e sostenibile dell'ambiente urbano.

La struttura spaziale della conoscenza permette di rendere confrontabili i potenziali delle diverse tecnologie per la produzione energetica da FER, altrimenti legati esclusivamente a dati di partenza e metodologie di stima specifici. Inoltre la localizzazione degli edifici, con le attività che contengono, quali sorgenti di domanda energetica, è fondamentale per il progetto e l'ottimizzazione delle infrastrutture energetiche e la produzione decentralizzata dell'energia necessaria al suo soddisfacimento [162]. La pianificazione dei mix funzionali dei distretti urbani contribuisce alla modulazione dei picchi di domanda delle reti energetiche, aumentando l'efficienza del sistema e determinandone i parametri di dimensionamento.

La spazializzazione dell'informazione può facilitare la comunicazione di argomenti specialistici anche a un pubblico non esperto, perché permette il disegno di mappe tematiche di sintesi capaci di rappresentare le caratteristiche degli elementi del sistema in rapporto al contesto generale. L'informazione spazializzata permette di creare mappe, rapporti di sintesi e grafici, pubblicabili tramite WEB-GIS e GEOblog, che possono essere preziosi strumenti per la diffusione dell'informazione e per il recupero di dati quanto qualitativi da feedback volontari, utili alla rappresentazione stessa del fenomeno.

2.3.6 Approccio tipologico

La tipizzazione, o la valutazione per classi e gruppi di elementi simili, si basa sull'evidenza, più o meno confermabile nella realtà, che vi siano alcuni aspetti ricorrenti che caratterizzano il fabbisogno energetico di un edificio e, per estensione, dell'intero patrimonio urbano. L'approccio per tipo è uno degli strumenti più usati per colmare la cronica mancanza di dati, che caratterizza lo studio dei consumi energetici del settore residenziale, e per semplificare fenomeni complessi, in favore della comprensione e comunicabilità della conoscenza. La tipizzazione consiste nell'utilizzo di indici sintetici o valori rappresentativi di un fenomeno più complesso, impostando classi di valore e profili tipo: le caratteristiche fisiche degli involucri possono essere definite tramite tecnologie costruttive tipo, legate agli anni di costruzione; la grande variabilità delle soluzioni impiantistiche viene spesso semplificata in base a livelli di rendimento medio stagionale; il comportamento umano può essere approssimato a un profilo di utente standard. Per definire quali dati, tra quelli utili al calcolo o di interesse per lo studio, siano da tipizzare, è necessario capire quali di questi possano essere ricavati da informazioni disponibili, con il dettaglio richiesto, e quali possano essere le azioni di rilievo e campionamento realizzabili. La tipizzazione perciò è un potente espediente semplificativo, utile a colmare le lacune dei dati di partenza, ma non solo: essa assume anche un ruolo non secondario di interpretazione della realtà: se per assurdo si conoscessero con precisione tutti i dati riguardo edifici e consumi, a causa della enorme mole di informazione, questa non sarebbe direttamente utilizzabile dagli attori del processo decisionale e richiederebbe ancora una pesante opera di sintesi, che porterebbe ancora una volta a una lettura per tipi o classi. D'altra parte la rappresentazione e lo studio del sistema urbano complesso attraverso

la sintesi di un numero minore di parametri, definiti tramite semplificazioni e approcci tipologici, può contribuire a individuare indicatori aggregati, capaci di sottolineare gli aspetti più rilevanti o di maggiore interesse per il governo dei processi di retrofitting energetico urbano. L'introduzione di approcci semplificativi, caratterizzati da un certo grado di generalità, nei modelli di rappresentazione del fabbisogno energetico del patrimonio edificato, può contribuire a definire metodologie esportabili in diversi contesti favorendo il benchmarking tra diverse realtà urbane [163]. L'obiettivo non è tanto l'esatta misurazione o simulazione del fenomeno, quanto la ricerca di un insieme condiviso di valori, che possano facilmente essere comunicati e compresi anche da un uditorio non tecnico, diventando gli elementi per la definizione e la valutazione di scenari alternativi e favorendo le attività di trasferimento di buone pratiche.

La semplificazione introdotta dagli approcci tipologici può essere di diverso grado di complessità: adottare dei valori semplici o anche prospetti articolati, oppure definire delle procedure più o meno complesse per assegnare tali valori. L'approccio tipologico può riguardare le caratteristiche fisico costruttive del sistema edificio impianto, ma anche profili d'uso e di consumo, caratteristiche socio economiche degli utenti e preferenze nel recupero e riqualificazione dell'immobile [164]. Per definire le prime, generalmente ci si appoggia a dati statistici disponibili e alla conoscenza delle consuetudini costruttive locali strutturando abachi delle strutture edilizie generalmente legate all'anno di costruzione [165], mentre per gli aspetti più legati alla componente umana si fa spesso ricorso a tecniche statistiche [166], basate sul campione iniziale. L'archetipo può contenere già i risultati della simulazione energetica, effettuata con strumenti dedicati, che poi saranno generalizzati alla scala urbana tramite opportune tecniche basate sulle caratteristiche disponibili per tutti gli edifici [167], oppure può limitarsi a raccogliere e organizzare tutti i dati di input necessari alla modellazione energetica, che poi verrà svolta edificio per edificio per tutto l'ambito urbano selezionato, secondo modelli energetici più o meno complessi brute force [127]. Nel primo caso la simulazione energetica per gli edifici campione può essere molto accurata, ma anche impegnativa nella fase di pre processing, in caso di numerose tipologie da analizzare, inoltre la precisione della metodologia è comunque fortemente determinata dalle tecniche utilizzate per ricavare i risultati per tutto il patrimonio. Nel secondo caso la parte di studio dell'archetipo è minore, ma le attività di rilievo e riordino dei dati possono essere molto impegnative perché il calcolo energetico svolto per ogni edificio a scala urbana richiede molti più dati di ingresso e sforzo computazionale: in questo caso la verosimiglianza dei risultati è fortemente legata al tipo di algoritmo di calcolo adottato e alla affidabilità dei dati di base.

La definizione di procedure e approcci di pre processing, per classificare e caratterizzare in maniera efficace gli archetipi, è un argomento centrale nel dibattito scientifico, in quanto, insieme alla attività di rilievo, costituisce la fase più costosa e meno standardizzabile di questo tipo di metodologie [168] [169] [170] [171]. Pur nella variabilità degli approcci, fortemente legati agli scopi degli studi e ai modelli energetici utilizzati, alcuni autori individuano le seguenti fasi concettualmente consequenziali per lo sviluppo di un approccio tipologico: *Segmentazione (o classificazione)*, *Caratterizzazione*, *Distribuzione (o assegnazione)*, *Calibrazione o validazione*.

La *Segmentazione (o classificazione)* è una fase di tipo preliminare che riconosce gli elementi ricorrenti del patrimonio edilizio di interesse per lo studio, e ne definisce la frequenza e la distribuzione spaziale, classificando tutti gli elementi dell'area oggetto di studio. Le metodologie utilizzate sono varie, vanno dalla semplice conoscenza esperta integrata, supportata dalle statistiche disponibili sul patrimonio edilizio, al ricorso a tecniche di analisi multivariata (Analisi della correlazione clustering, ACP), volte a riconoscere i gruppi omogenei su cui sviluppare una caratterizzazione. In alcuni casi si fa ricorso anche a campagne di rilievo, più o meno estese, volte allo studio del patrimonio e all'identificazione delle ricorrenze.

La *Caratterizzazione* definisce i contenuti specifici degli approcci tipologici adottati in termini di dati di ingresso per modello energetico ed eventuali altri scopi della metodologia (valutazioni economiche, potenziale FER, qualità interna).

La *Distribuzione (o assegnazione)* è la procedura utilizzata per assegnare a tutti edifici dell'area di studio i valori definiti nella caratterizzazione, essenzialmente dipendente dal tipo di segmentazione effettuato in precedenza e dal modello energetico adottato. Nel caso di approcci totalmente simulati, la distribuzione

assegna, sulla base di alcuni valori chiave definiti nella segmentazione, tutti i valori, riportati nella caratterizzazione, a ogni edificio dell'area di studio per permettere l'esecuzione del calcolo completo. Negli approcci misti, la distribuzione riporta a tutto l'ambito di studio i risultati ottenuti per gli edifici campione tramite semplici approcci moltiplicativi o con algoritmi di statistici più o meno raffinati.

La *Calibrazione* e la *Validazione* sono delle fasi che nel recente dibattito disciplinare hanno assunto un ruolo centrale, in quanto una delle criticità degli UBEEM è infatti la difficoltà a validare i modelli e a valutare il grado di incertezza dei risultati [172].

La definizione di una semplificazione per tipologia svolge perciò una funzione differente a seconda del tipo di approccio alla modellazione adottato: approcci top down, bottom up statistici, bottom – up analitici, misti.

Nel caso di approcci top down l'approccio tipologico serve per aumentare il dettaglio (generalmente spaziale e/ temporale) delle informazioni di consumo note per ambiti spaziali aggregati. L'archetipo è in questo caso costituito dall'insieme di variabili che caratterizzano il patrimonio edificato, che possono essere note col dettaglio spaziale desiderato, che viene utilizzato come input per dettagliare spazialmente i valori noti di consumo tramite tecniche statistiche [173] [174] [175]. In questi casi la tipizzazione può anche comprendere dati noti di consumo col dettaglio dello studio, generalmente misurati o rilevati appositamente, per supportare procedure di calibrazione e validazione.

Nel caso degli approcci bottom up di tipo statistico i dati noti sono già posseduti con il dettaglio richiesto per un campione più o meno esteso dell'area di studio. La definizione dell'archetipo comprende le variabili da utilizzare per stimare tramite svariate tecniche regressive i consumi per tutti gli elementi dell'area di studio [176]. Trattandosi di approcci statistico inferenziali, l'archetipo può contenere dati di varia natura: solitamente si scelgono variabili relative alla parte fisica del patrimonio edilizio, o sull'uso. In questo caso la validazione del modello può essere eseguita tramite il confronto con i dati consumo, eventualmente noti in maniera aggregata per ambiti spaziali più ampi, che normalmente sono più semplici da ottenere, oppure anche tramite i fabbisogni ricavati per i singoli edifici con indagini o tramite modelli di simulazione.

Nel caso di modelli puramente analitici, la definizione degli archetipi assolve principalmente un ruolo semplificativo dei dati di input, volto a diminuire le attività di recupero e immissione dei dati, ad abbassare il carico computazionale e a colmare eventuali lacune informative. La definizione tipologica può essere perciò più o meno approfondita e riguardare alcuni o tutti gli aspetti che possono influire sulla simulazione energetica. Se il modello analitico può analizzare gli aspetti geometrici e del contesto a partire dai dati di base topografici, la definizione tipologica dell'involucro può limitarsi a definire la relazione tra le tipologie architettoniche presenti nel contesto (abachi delle tipologie edilizie) e le caratteristiche termo fisiche dei materiali (data base delle strutture edilizie) [177]. Anche la componente umana può essere eventualmente considerata nel definire l'archetipo dedicato alla simulazione, introducendo coefficienti standard o adottando profili molto articolati [178]. In questo caso la calibrazione riguarda i risultati del modello di simulazione analitica, che può essere svolta a diverse scale, aggregata o di singolo edificio, in funzione dei dati reali disponibili. In mancanza di dati reali sono correntemente utilizzate metodologie di confronti tra i risultati del modello, ottenuto sulla base dell'approccio tipologico adottato, e quelli ottenuti tramite software di controllo consolidati generalmente dedicati al calcolo energetico per i singoli edifici.

2.3.7 Calibrazione e Validazione

Come già accennato, la procedura di calibrazione dei modelli, utilizzata per ridurre l'incertezza insita nelle assunzioni che stanno alla base della definizione degli archetipi, ha assunto un ruolo centrale nella impostazione degli UBEEM soprattutto più recenti. La calibrazione è utilizzata per far variare i parametri di input dei modelli contenuti negli archetipi ed eventualmente alcuni fattori della procedura di stima, al fine di migliorare la rispondenza tra i risultati stimati e quelli reali.

La validazione avviene a valle del processo di stima e simulazione dell'UBEEM ed è orientata a valutare il grado di affidabilità dei risultati. Essa prevede generalmente il confronto impostato con diverse scale temporali e

spaziali tra i risultati ottenuti dal modello e quelli di alcuni dati reali di consumo. Gli UBE sono strumenti pensati per la stima dei consumi per gruppi più o meno numerosi di edifici, scala alla quale le assunzioni medie e tipologiche effettuate negli archetipi possono essere ritenute di una qualche validità (scostamenti 1% - 20%, nelle simulazioni del singolo edificio si possono ritrovare scostamenti molto forti, 10% - 99%) [108]. Considerando che i dati reali sono spesso disponibili per un vasto gruppo di edifici (quartiere o città), la validazione è eseguita per tutta l'area di studio; spesso per validazioni più di dettaglio si utilizzano approcci simulativi eseguiti con software di confronto o comparazioni con dati misurati per un campione di edifici. Gli indici più utilizzati in letteratura per la valutazione dell'accuratezza del processo di calibrazione e per la validazione del modello calibrato sono l'errore quadratico medio (Mean Bias Error, MBE) (equazione 1) e il coefficiente di variazione della radice del MBE (Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error (CVRMSE) (equazione 2), applicabili su base annuale, mensili e giornaliera. Il primo indica la discrepanza quadratica media fra i valori misurati e quelli stimati. Il CVRMSE è una misura della deviazione campione delle differenze tra i valori misurati e i valori previsti dal modello. Per evitare errori di compensazione, si è soliti utilizzare entrambi gli indici per la validazione di un modello. Per ASHRAE [179] i valori di soglia del MBE sono ± 5 e ± 10 rispettivamente per l'intervallo mensile e orario; mentre analogamente per il CVRMSE i valori limite sono ± 15 e ± 30 .

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^j S_i - M_i}{\sum_{i=1}^j S_i} \quad (1)$$

$$CVRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^j (S_i - M_i)^2 / j}}{\bar{S}} \quad (2)$$

Dove:

S = dati monitorati dello specifico servizio energetico con i – esimo intervallo temporale per un totale di j osservazioni (12 per simulazione mensile, 8760 per simulazione orario)

M = dati simulati dello specifico servizio energetico con i – esimo intervallo temporale per un totale di j osservazioni (12 per simulazione mensile, 8760 per simulazione orario)

In letteratura si riportano quattro tipologie di approcci alla calibrazione dei modelli energetici per gli edifici:

- calibrazione manuale iterativa, basata sulla conoscenza esperta dell'operatore che modifica i dati di input e valuta nuovamente i risultati dei indici MBE CVRMSE;
- calibrazione manuale supportata da metodi grafici;
- calibrazione basata su campagne di rilievo specifiche e metodi analitici - Primary and Secondary Term Analysis and Renormalization method (PSTAR) [180];
- calibrazione automatica o semi automatica basata su approcci matematici [181].

La calibrazione manuale è la più semplice e immediata e, anche se molto legata alla esperienza dell'operatore, ha dato prova di essere efficace nella pratica professionale relativa alle simulazioni energetiche negli edifici. Tuttavia una diretta applicazione a scala urbana di una attività manuale, e ancor più di procedure basate su dati rilevati per la validazione a campione su alcuni edifici o gruppi di essi, può essere complessa e richiedere molto tempo. In questo senso stanno avendo grande diffusione le tecniche di calibrazione automatica, basate su diversi tipi di approcci matematici, che, per quanto sviluppate per lo studio di modelli alla scala del singolo edificio, possono essere svolte dal calcolatore anche per una gran quantità di casi.

Un esempio è l'utilizzo di metodi Bayesiani per ridurre l'incertezza dei parametri di input, che influenzano il modello energetico, attraverso metodi probabilistici di analisi della sensitività volti a conciliare i valori simulati con i dati misurati [182] [183]. I casi studio relativi alla definizione degli archetipi per gli UBE mostrano tuttavia una gran quantità di approcci e tecniche utilizzate [184] [185], che si specificano per gli scopi dello studio e in funzione della struttura del modello energetico e dei dati di input. L'uso dei metodi di

calibrazione è un aspetto ormai centrale nello sviluppo degli UBEM, che permette di limitare i dati input e garantire una certa affidabilità dei risultati, tuttavia la loro applicazione solleva diverse criticità riferite alla effettiva reperibilità dei dati sugli usi finali energetici, necessari alla calibrazione e all'aumento della complessità e del carico computazionale dei modelli. Infatti in diversi casi studio sono stati utilizzati dati medi di consumi, ricavati da dati medi noti a scala sovra locale (regionale, nazionale, urbana) per calibrare modelli aventi dettaglio spaziale sub comunale.

2.3.8 Modelli integrati in ambiente GIS

In questi anni si è assistito a un notevole sviluppo di UDEM integrati in ambiente GIS, che è lo strumento ideale per gestire e rappresentare dati geografici di diversa natura e che può integrare modelli di calcolo anche complessi con interfacce relativamente semplici, garantendo un buon grado di interoperabilità dei risultati e dei dati di base [186]. Il GIS è lo strumento ideale per le analisi a scala urbana e sub urbana che necessitano di esplicitare le differenze tra parti della città, al fine di settare strategie più specifiche e quindi efficaci, legando i luoghi di produzione a quelli di consumo. Esso può gestire approcci multi scala, e la dimensione spaziale permette di integrare i risultati con altri tematismi propri della pianificazione urbanistica, anche non direttamente legati alla tematica [187]. Definire il dettaglio spaziale necessario in funzione degli scopi dei modelli e dei dati disponibili è un aspetto centrale nello sviluppo di procedure GIS [188]

I modelli energetici possono essere eseguiti completamente al di fuori dell'ambiente GIS, con software e procedure dedicati [189]; in questo caso lo strumento supporta nella lettura delle geometrie di base degli edifici e nell'impostazione dei dati di ingresso e, naturalmente, viene utilizzato per la visualizzazione dei risultati (mappe 2D, 3D o grafici). In altri casi il GIS ospita procedure appositamente sviluppate per svolgere le operazioni di spazializzazione dei risultati dei calcoli energetici svolti a livello di archetipo [190], o esegue direttamente la modellazione energetica semplificata per ogni edificio [191]. Gli approcci GIS si prestano allo sviluppo di interfacce WEB, facilitando la diffusione dei modelli e la comunicazione dei risultati anche presso attori interessati di estrazione culturale non tecnica [192]. Inoltre essi sono compatibili con gli strumenti BIM, più propri della progettazione edilizia di dettaglio, aprendo la prospettiva di sviluppo di strumenti multi scala, particolarmente efficaci per il supporto a strategie di efficientamento del patrimonio edilizio [193].

BIM e GIS sono entrambi dedicati alla rappresentazione e alla gestione di dati di tipo spaziale, ma il loro focus è tradizionalmente differente: il GIS nasce per supportare la pianificazione urbana e ambientale alla scala territoriale e urbana, mentre il BIM nasce per supportare il progetto e la gestione degli edifici tramite modelli parametrici tridimensionali, che possono arrivare al dettaglio dei singoli componenti dei sistemi impiantistici. Non mancano tuttavia esempi di uso differenti per entrambi gli strumenti. Attualmente vi sono diverse esperienze che cercano di sviluppare piattaforma per la condivisione e la gestione di dati geografici provenienti dai due sistemi [194], idealmente la scala alla quale si può avere questa integrazione sembra essere quella dell'edificio, rappresentato con i suoi elementi esterni principali, che può rappresentare lo spartiacque tra i due sistemi: per dettagli maggiori il BIM è più adatto mentre per focus più ampi si passa al GIS. Tuttavia i livelli di dettaglio dei modelli urbani in GIS (LoD) (figura 2.29) hanno diversi elementi in comune con quelli adottati per gli strumenti BIM, chiamati Level of Development (sempre LoD), proposti dall'*American Institute of Architects (AIA)* che vanno dal modello 3D concettuale, al modello completo dell'edificio con i suoi sistemi dell'*as built*:

- LOD 100, progetto concettuale;
- LOD 200, informazioni approssimative sugli elementi dell'edificio corrispondenti alla "progettazione preliminare";
- LOD 300, informazioni dettagliate di ogni elemento e sistema corrispondenti al "progetto definitivo";
- LOD 400, informazioni dettagliate di ogni elemento e sistema corrispondenti al "progetto esecutivo"
- LOD 500, informazioni dettagliate di ogni elemento e sistema corrispondenti al "*as built*".

LOD 100	LOD 200	LOD 300	LOD 400	LOD 500
				
Modello contenente i requisiti di prestazione e le specifiche del sito. Modello concettuale di massa utile allo studio di tutto l'edificio inclusi area di base e volume, orientamento, stima costi iniziale. Progetto preliminare.	Modello contenente i sistemi generalizzati con quantità, dimensioni, forme, posizione ed orientamento approssimati. Progetto definitivo.	Modello di produzione o pre-costruzione, e per gli "intentivi progettuali". Modello accurato e coordinato, utile per una stima più accurata dei costi. Progetto Esecutivo.	Modello accurato con i requisiti di costruzione e gli elementi costruttivi specifici.	Modello "as built" dell'edificio che mostra il progetto così come è stato realizzato.

Figura 2.29. Definizione dei LOD dell'AIA.

Tuttavia vi sono diversi standard normativi adottati per impostare i contenuti dei livelli informativi degli approcci BIM (ISO 19650, CEN 442, e altre declinazioni nazionali) [195]: la normativa italiana (UNI 11337: 2017) ha un approccio fortemente orientato alla gestione del processo progettuale, definendo più livelli generali di dettaglio (LoD A oggetto simbolico; LoD B oggetto generico; LoD C oggetto definito; LoD D oggetto dettagliato; LoD E oggetto specifico; LoD F oggetto eseguito; LoD G oggetto aggiornato) e definendo i contenuti in funzione del tipo di fase (figura 2.30), al quale il BIM è dedicato (la nuova costruzione ed il recupero, il territorio e le infrastrutture, i mezzi e le attrezzature, il restauro ed i beni vincolati).

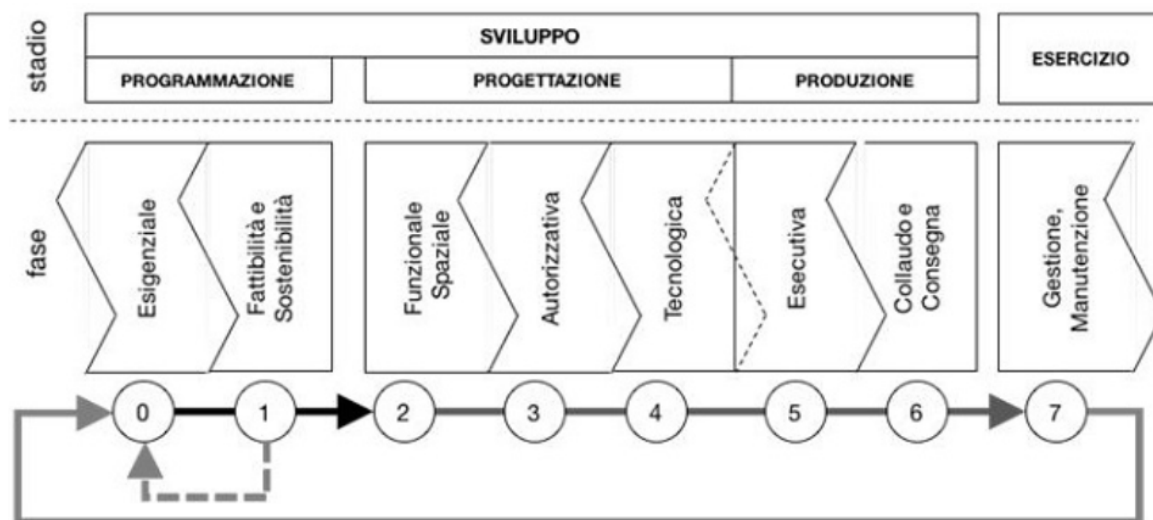


Figura 2.30. Fasi del processo informativo in edilizio (tratta da UNI 11337 -1).

Le definizioni stesse dei livelli di dettaglio enfatizzano il ruolo centrale del progetto nel caso dei BIM, e la centralità della rappresentazione geografica per i GIS, tuttavia si hanno ampie sovrapposizioni tra le due definizioni, che hanno portato a sviluppare procedure di integrazione dedicate ai diversi livelli informativi. Il primo problema di integrazione tra i due sistemi è di tipo tecnico, in quanto essi adottano diversi tipi di file di interscambio, che però presentano strutture non direttamente compatibili. Il secondo problema è la conversione corretta delle geometrie nel rispetto del livello di dettaglio desiderato, e il terzo è la gestione corretta dei contenuti informativi che possono avere ambiti semantici differenti.

Molti studi hanno mostrato come convertire il modello di dati più diffuso proprio del BIM l'Industry Foundation Classes (IFC) in superfici in ambiente GIS (CityGML - City Geography Markup Language) trasferendo le informazioni parametriche (totalmente o parzialmente), tramite l'adozione di standard e di appositi tool [196] (figura 2.31). Un altro approccio è la creazione di un ambiente condiviso di regole e strumenti per la creazione di rappresentazioni coerenti fin dal principio [197], in questo senso di sono mostrate metodologie basate sui linked data per impostare le relazioni tra i due modelli [198], e sono promettenti gli approcci che utilizzano la tecnologia del WEB semantico e del Resource Description Framework (RDF) per lo scambio di metadati dello schema [199] [200].

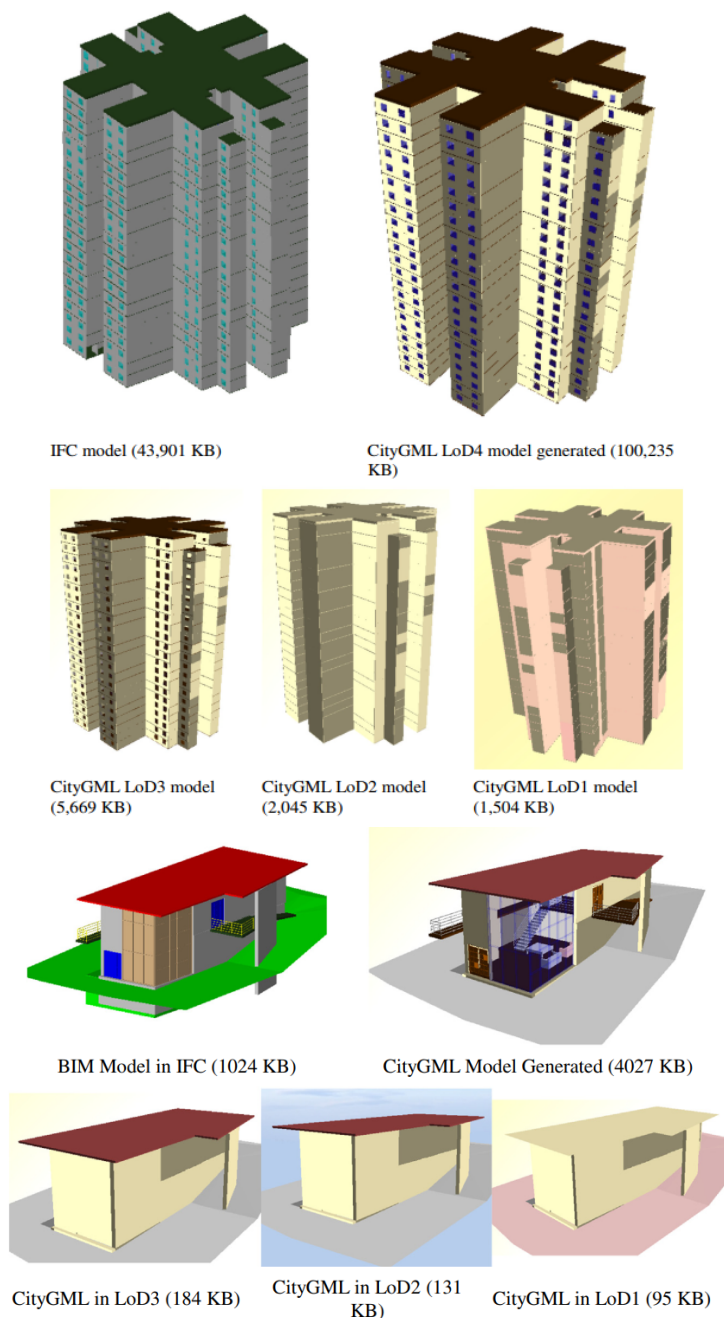


Figura 2.31. Alcuni esempi di conversione da IFC a GML (tratte da [198]).

Le esperienze presenti in letteratura usano la capacità dei BIM e dei GIS in diversi campi, mostrando diverse tipologie di integrazione, che possono essere così schematizzate [201]:

- *BIM guida e GIS supporta*, ossia la metodologia si basa su procedure BIM che però ricavano alcuni dati o eseguono solo alcune procedure, appoggiandosi a un GIS esterno. Ad esempio un progetto di recupero di un edificio storico che è interamente impostato su BIM, ma utilizza risorse spaziali GIS per aggiungere dati [202].
- *GIS guida e BIM supporta*, ossia la metodologia richiede le capacità di condivisione e rappresentazione geografica dei GIS: i dati provenienti da BIM esterni e sono convertiti ed importati in ambiente GIS tramite IFC e poi trattati come geografici [203].
- *BIM e GIS integrati*, si tratta di metodologie basate sull'uso di regole e strumenti per garantire l'interoperabilità tra i due standard e la coerenza dei contenuti nei diversi livelli di dettaglio [204]. Ad esempio nella modellazione energetica degli edifici alla scala urbana può essere utile ricavare alcuni dati dall'analisi dell'ambiente urbano e integrare nello stesso ambiente il modello geometrico fisico tecnologico dei singoli edifici, derivato da modelli BIM [205]. Il maggiore svantaggio di questo tipo di approccio è che può generare un aumento notevole del carico computazionale e della complessità delle architetture informatiche, che allo stato attuale le tecnologie hardware disponibili e gli strumenti di integrazione non sono ancora in grado di superare appieno [206].

Esistono diverse esperienze che adottano una combinazione di strumenti GIS e BIM per le tematiche di efficientamento energetico del patrimonio edilizio nella valutazione preliminare del progetto urbano [207]. Le architetture RTF possono essere utilizzate per integrare dati provenienti da sistemi GIS e BIM e ricavare dati energetici [208], coerenti con le diverse scale [209], e supportare i processi decisionali [210]. La creazione di un ambiente progettuale condiviso in cloud può contribuire a promuovere l'integrazione tra la pianificazione energetica urbana e il progetto energetico del singolo edificio [211]. L'integrazione tra diverse fonti di dati BIM, GIS, IOT e servizio meteorologico, può essere utilizzato per simulare il comportamento energetico degli edifici e supportare, nella gestione in tempo reale, l'ottimizzazione dei sistemi impiantistici [212].

Esistono diversi strumenti che supportano l'integrazione tra BIM e GIS (CityGML Utility Network ADE [213], BIM4GEOA [214], CityEngine [215], Active3D [216]), ma rimangono ancora alcuni limiti relativi alla accuratezza degli elementi geometrici e la gestione dei livelli di dettaglio per la rappresentazione, inoltre la maggior parte degli strumenti si concentra nella conversione da IFC a GML e non viceversa. Vi è ancora una forte eterogeneità dei contenuti semantici tra BIM e GIS legati alle diverse funzioni degli strumenti, ma anche alla presenza di standard in campo di BIM e di LoD non sempre convergenti, che spesso creano errori, anche nella preliminare conversione delle loro strutture informative nel formato di scambio IFC. Gli approcci più recenti sono perciò orientati allo sviluppo di servizi esterni ai BIM e ai GIS, prevalentemente basati su sistemi in cloud per impostare appropriati RTF capaci di importare i dati da entrambi le fonti, trattarli in maniera adeguata agli scopi specifici e restituire i risultati nei formati adatti a sfruttare le capacità proprie dei GIS e dei BIM. L'obiettivo finale è impostare un unico ambiente dove condividere e gestire un modello informativo urbano che integri le possibilità di entrambi gli strumenti e permetta l'uso dei dati per altri scopi [217].

3 Metodologia

3.1 *Obiettivo della ricerca*

L'obiettivo della ricerca è definire una metodologia di studio e sperimentare uno strumento per supportare il processo di recupero ed efficientamento del patrimonio edilizio tramite un approccio multi scala, che integra la prospettiva del singolo edificio con quella urbana e di quartiere, in un'ottica partecipativa adattata a contesti di piccola o media dimensione, caratterizzati da limitato accesso a risorse economiche e umane.

Diversi studi hanno individuato la mancanza di conoscenza come uno dei principali fattori critici del processo di efficientamento del patrimonio immobiliare. L'aspetto centrale consiste nella difficoltà di definire a priori il potenziale di efficientamento energetico di un edificio perché, oltre a essere strettamente dipendente dalle risorse economiche disponibili, è condizionato da limiti legati alle caratteristiche specifiche dell'immobile e del suo contesto e alla accessibilità e fattibilità locale delle diverse tecnologie. La mancanza di conoscenza ha effetto sui diversi attori coinvolti nel processo di efficientamento del patrimonio edilizio: gli operatori del settore, i fruitori finali, gli investitori e la PA, come peraltro già argomentato nel precedente capitolo.

Coerentemente con lo stato dell'arte delineato, l'approccio di studio è basato sulla esplicitazione degli elementi ricorrenti e sulla individuazione di profili d'uso tipo, che possono favorire l'individuazione di interventi di retrofitting standard e altamente ripetibili a carattere locale.

Lo scopo è supportare gli operatori del settore nella fase iniziale di analisi dell'edificio e di individuazione preliminare delle strategie di intervento, al fine di limitare i tempi e i costi della progettazione, e impostare delle metodologie costituendo un patrimonio conoscitivo accettato su base locale, utile anche alla comparazione tra diversi casi applicativi e alla condivisione di buone pratiche.

Per favorire la comunicazione, il linguaggio e le metodologie devono essere coerenti col contesto normativo locale e con gli standard tecnici nazionali. Il quadro normativo nazionale per la valutazione delle performance energetiche degli edifici è un riferimento culturale comune per i decisori della PA, gli utilizzatori degli edifici e naturalmente per gli operatori del settore. Tali normative vengono correntemente utilizzate tramite appositi software commerciali per l'esecuzione delle verifiche di legge, ma anche per la modellazione energetica finalizzata alla progettazione del sistema edificio impianto o allo studio delle opere di efficientamento. Perciò la metodologia si propone di utilizzare strumenti e riferimenti normativi già patrimonio comune per gli operatori del settore, e, per limitare le attività di rilievo sull'edificio e garantire l'attendibilità delle informazioni di base per la diagnosi degli edifici pubblici, la ricerca si orienta allo sviluppo e sperimentazione di uno strumento per le misure termofisiche sui materiali e le strutture più diffuse nel contesto.

Al fine di integrare la prospettiva del singolo edificio con la complessità del sistema urbano, lo strumento si propone come un sistema di supporto alla definizione di strategie di efficientamento energetico sul singolo edificio e su scala urbana, basato su una architettura informatica integrata tra GIS, propria della dimensione urbana, e BIM tipica della progettazione degli interventi edilizi. In altre parole, lo strumento si configura come un modello urbano del patrimonio edilizio (City Model), dove ogni singolo oggetto edilizio contiene le informazioni tipologiche definite in precedenza e può essere utilizzato, tramite opportune procedure, per individuare preliminarmente le ipotesi di retrofit. Il modello urbano nel suo complesso può essere usato per definire e valutare scenari progettuali e i possibili effetti di politiche di incentivazione su ambiti spaziali più ampi, oppure per tipologia edilizia e/o di utilizzo. La rappresentazione geografica facilita la comunicazione della conoscenza e mantiene una struttura aperta, che permette l'aggiunta di nuovi contenuti informativi, anche non direttamente legati al processo di efficientamento energetico. Il modello urbano è integrato in un portale multi utente, che favorisce la partecipazione dei diversi tipi di attori locali coinvolti nel processo di recupero ed efficientamento del patrimonio edilizio, che da una parte acquisiscono conoscenza dal portale, e dall'altra forniscono preziose informazioni di feedback per raffinare il City Model nei contenuti e nelle metodologie stesse, generando un flusso informativo bidirezionale continuo.

Gli strumenti e le metodologie orientate all'efficientamento energetico adottano generalmente un modello energetico urbano, per la stima del fabbisogno di energia, e procedure per la definizione del potenziale di diverse tecnologie di efficientamento e produzione da FER. Uno degli approcci semplificativi più utilizzati è quello tipologico, che prevede lo studio di un campione rappresentativo del patrimonio e l'utilizzo di appropriati metodi per la generalizzazione dei risultati a tutti gli elementi simili presenti nel centro urbano.

Lo sviluppo di modelli e strumenti per lo studio di processi alla scala urbana sta avendo una rapida diffusione in questi anni. La letteratura riporta diversi casi orientati al supporto all'efficientamento energetico del patrimonio edilizio, tuttavia essi sono generalmente di natura piuttosto sperimentale e legati a contesti con ampia disponibilità di risorse economiche e umane. Altre applicazioni si stanno sviluppando in casi dove la disponibilità dei dati base e la configurazione del patrimonio edilizio facilita notevolmente l'applicazione di questi strumenti. Lo sviluppo di un modello/approccio basato su procedure e strumenti ripetibili anche in contesti ordinari, dove è necessario trovare un equilibrio tra le finalità dello strumento e le risorse disponibili, è ancora un tema centrale del dibattito internazionale.

Il presente lavoro si propone lo sviluppo di una metodologia e la sperimentazione di uno strumento che possa essere facilmente esportabile in centri di piccola e media dimensione, caratterizzati da una ordinaria disponibilità di dati base e da un limitato accesso alle risorse. Alcuni aspetti sembrano essere centrali al fine di limitare i costi e favorire la replicabilità della metodologia:

- essere coerente con le normative e con i linguaggi tecnici consolidati;
- prevedere in primo luogo l'utilizzo di dati di base già disponibili, eventualmente integrati con semplici attività di rilievo tradizionali o innovative;
- definire protocolli e strumenti di facile uso;
- adottare una rappresentazione della conoscenza multi livello capace di interfacciarsi in maniera appropriata a una multi utenza.

Una fase fondamentale dello sviluppo dell'attività di ricerca sarà la sperimentazione dello strumento comunicativo e della sua struttura informativa su alcuni casi reali, coinvolgendo attivamente gli attori locali, ognuno nel proprio ruolo e campo di interesse. Tale esperienza darà informazioni preziose per calibrare e raffinare meglio la versione finale dello strumento, e inoltre potrà contribuire notevolmente al dibattito scientifico nazionale e internazionale circa lo sviluppo di approcci simili, esplicitando le criticità incontrate e sottolineando i punti di forza e di debolezza della metodologia sviluppata.

A tal fine si è scelto come ambito di studio il contesto locale della città di Carbonia. Carbonia si distingue per essere una città mineraria di fondazione, costruita durante il periodo fascista, che ha avuto il primo nucleo di edificazione terminato nel 1938. Il contesto è perciò molto adatto alla sperimentazione della metodologia perché è caratterizzato da un patrimonio immobiliare piuttosto omogeneo dal punto di vista materico costruttivo, con una percentuale di edifici di proprietà pubblica, sia residenziali che non, fra le più alte di Italia. Il contesto locale è caratterizzato da una diffusa qualità paesaggistica e ambientale, ed è preservato da un corposo apparato normativo di natura nazionale e regionale; in particolare la maggior parte del patrimonio immobiliare pubblico può essere considerato storico (in quanto realizzato prima del 1950) oppure caricato di valori paesaggistici e/o identitari di carattere locale. Il contesto locale è gravato da limitate risorse socio – economiche, che necessitano lo sviluppo di un approccio a basso costo facilmente ripetibile.

Considerando le priorità evidenziate nella letteratura disciplinare e le caratteristiche del contesto, la metodologia si propone di contribuire alla selezione delle più appropriate tecnologie per il miglioramento delle prestazioni energetiche e delle dotazioni tecnologiche del patrimonio edilizio, tenendo presente i seguenti aspetti:

- preservare i valori storico - paesaggistici dell'edificio e del suo contesto di relazione;
- coinvolgere gli attori potenzialmente interessati al processo di selezione delle tecnologie delle azioni di retrofitting dell'edificio;
- assicurare un sufficiente comfort interno, valutato sugli usi attuali o su quelli previsti;
- identificare alcune caratteristiche tipologiche locali degli edifici;

- definire procedure e strumenti coerenti con le risorse e la disponibilità locale delle soluzioni tecnologiche proposte.

Gli approcci metodologici presentati in seguito hanno un carattere preliminare, in quanto le procedure e gli algoritmi sono basati sui risultati delle fasi preliminari di analisi dei dati e recupero delle informazioni di base presso amministrazioni pubbliche (Comune, ISTAT), che è in fase di conclusione, e sono anche fortemente condizionati dai risultati di future attività di rilievo e di sensibilizzazione locale.

Scopo di questo capitolo metodologico è definire il framework generale della ricerca e individuare i punti cruciali che su cui verranno sviluppate le attività delle successive annualità del progetto.

3.2 Approccio metodologico generale

La ricerca si incentra su un approccio metodologico per lo sviluppo di un “*Abaco geografico SMART per il recupero ed efficientamento energetico del patrimonio edilizio urbano*”: vi sono diversi esempi di linee guida o protocolli di qualità sul tema dell’efficientamento energetico di particolari tipologie di edifici, ma in genere essi non sono integrati in un vero e proprio strumento di supporto su base geografica che lo contestualizzi, ne supporti la consultazione e ne favorisca l’uso e l’aggiornamento. Perciò il progetto di ricerca si articola principalmente su alcuni grandi temi:

- Studio e codifica di una metodologia di indagine e rappresentazione del patrimonio edilizio;
- Sviluppo dell’approccio al City Modeling;
- Definizione e sperimentazione dello strumento di comunicazione.

Lo strumento si presenta come un protocollo di analisi di rappresentazione del patrimonio edilizio, basato sui dati geografici aperti localmente disponibili (SDI), speditive attività di rilievo e uso di sensoristica, combinati in uno strumento di comunicazione e coinvolgimento degli attori locali sviluppato su infrastruttura WEB GIS. Si tratta di un approccio di SMART Planning, che integra gli open data disponibili con le emergenti tecniche di data harvesting legate agli SMART Building, al fine di costituire una piattaforma comune per la creazione, sintesi e condivisione della conoscenza a supporto dei processi di recupero ed efficientamento energetico del patrimonio edilizio pubblico e privato.

In via preliminare, si può definire che il City Modeling è principalmente volto alla definizione di quattro gruppi o *layers* geografici che costituiscono la base informativa su cui si sviluppano i servizi offerti nel portale e l’interazione con gli attori locali:

- *layers del contesto*: studio e rappresentazione degli elementi del contesto urbano che possono influenzare le possibilità di recupero sostenibile del patrimonio;
- *edifici pubblici*: strumenti di supporto per PA nella gestione energetica di qualità dell’edificio e per progettisti tramite linee guida e strumenti (BIM);
- *layer del patrimonio edificato*: rappresentazione del patrimonio edilizio con approcci GIS nelle sue caratteristiche di efficienza energetica e di potenziale di recupero sostenibile tramite UBEM;
- *abaco geografico*: raccoglie e riordina la conoscenza sugli elementi ricorrenti del patrimonio edilizio su base spaziale GIS, favorendone la diffusione multi utente.

Sulla base degli approcci riportati in letteratura, si ritiene utile sviluppare due approcci conoscitivi e di rappresentazione differenti per gli edifici pubblici e per il resto del patrimonio. Nel caso degli edifici pubblici, si propone un protocollo basato su procedure di audit energetico e di monitoraggio, finalizzato sia alla rappresentazione geografica e alla condivisione dei risultati, che al supporto alle fasi di progetto, realizzazione, monitoraggio e gestione delle opere tramite approcci BIM. Per il patrimonio edificato nel suo complesso, si propone di sviluppare un approccio basato sullo studio delle tipologie edilizie e dei suoi elementi ricorrenti, accoppiato allo sviluppo di UBEM, utile a valutare il potenziale di retrofit del patrimonio edilizio.

L’abaco geografico è un data base informativo di supporto a entrambi i layers del patrimonio edilizio: esso ha la funzione di facilitare le attività di progetto e la valutazione delle opere di riqualificazione energetica tramite la rappresentazione geografica delle architetture più diffuse e la proposta di adeguate tecnologie legate al mercato locale.

I layers del contesto sono un insieme aperto di tematismi, anche non direttamente legati agli aspetti della efficienza energetica, che possono però influenzare le potenzialità di recupero. Non si tratta di una semplice raccolta dei vincoli normativi, ma crea una conoscenza di sfondo condivisa tra i decisori e gli operatori del settore per indirizzare verso lo sviluppo di approcci olistici al progetto a scala urbana.

Lo strumento di rappresentazione e condivisione delle informazioni è basato su una infrastruttura web multi utente (portale dedicato), capace di coinvolgere i diversi tipi di attori interessati. Esso si configura come un’interfaccia che gli attori possono utilizzare per esplorare e consultare la base informativa, ma anche per

fornire il proprio feedback e contributo nel rispetto dei rispettivi interessi e livelli di accesso. In via preliminare esso potrà comprendere: materiale documentale e informativo, i casi studio sviluppati, gli abachi degli elementi tipologico costruttivi ricorrenti, elenchi di interventi di efficientamento e pratiche virtuose realizzate, statistiche riassuntive e indici sullo stato delle prestazioni energetiche del patrimonio immobiliare, statistiche e dati sul monitoraggio dei consumi energetici e degli interventi realizzati sugli edifici pubblici. In questo modo si realizzerà una base informativa dinamica, che alimenta e aggiorna i suoi contenuti sulla base dell'interazione degli utenti del portale e con i dati ricavati dai sensori.

Oggetto della ricerca è quindi definire nel dettaglio le procedure e gli strumenti che collegano i diversi contenuti tematici (layer edifici pubblici, layer patrimonio edilizio, abaco geografico, layer di contesto, dati rilevati dai sensori) alla rappresentazione e interazione con gli attori locali attraverso il portale (figura 3.1).

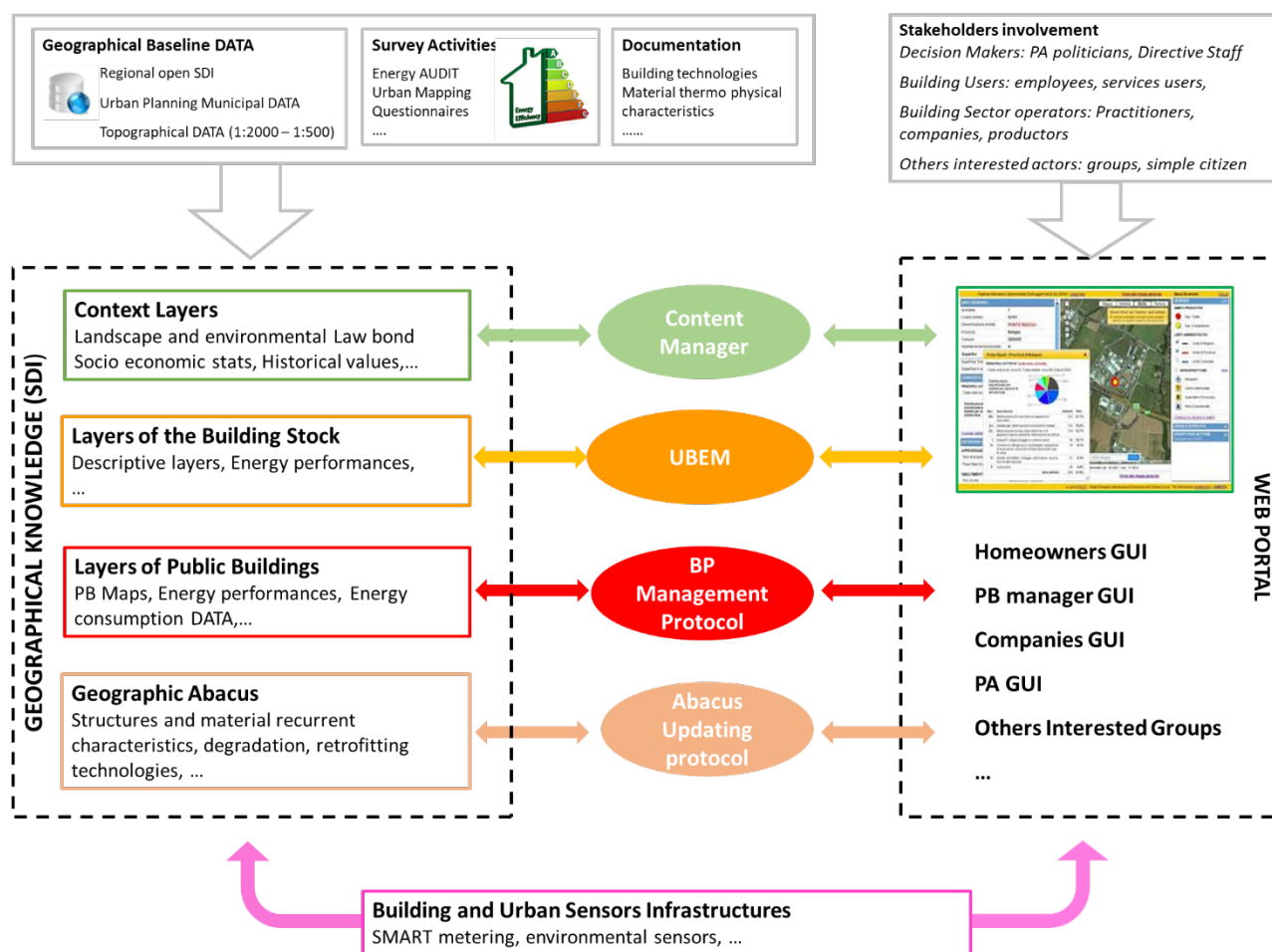


Figura 3.1. Schema logico dello strumento.

3.3 Fasi della ricerca

Lo sviluppo dello strumento può essere articolato in tre fasi concettuali logicamente consequenziali e graduali (figura 3.2): la fase di analisi e rilievo, inerente le informazioni disponibili e quelle recuperate per lo studio, la fase di rappresentazione geografica della informazione, la fase di sviluppo dello strumento di comunicazione.

La prima fase focalizza l'attenzione sulla definizione di un set minimo di dati necessario allo sviluppo della metodologia, basato sulle informazioni localmente disponibili e sullo sviluppo di appropriate tecniche di rilievo. Nel presente caso esse sono piuttosto articolate, riguardando attività di audit energetico (edifici pubblici ed edifici campione), attività di rilievo a scala urbana, sensoristica e metodologie di partecipazione.

Il passaggio dalla fase iniziale a quella successiva di rappresentazione avviene con la definizione degli algoritmi e delle procedure per la trattazione dei dati spaziali, lo sviluppo del modello energetico e dell'approccio tipologico associato, e l'attuazione della rete di sensori. La fase di rappresentazione si focalizza sulla scelta delle informazioni e delle tecniche rappresentative per i quattro principali temi che compongono il portale.

La terza fase di sviluppo dello strumento di comunicazione prevede un step iniziale di sperimentazione della rappresentazione dei contenuti informativi e di progetto delle interfacce di dialogo dei diversi user del portale, attraverso la realizzazione di una versione *beta* del portale, e l'impostazione di un processo partecipativo locale. La definizione dello strumento di comunicazione, nella sua versione finale, si baserà quindi sui risultati di questa sperimentazione e si concentrerà sulla definizione delle interfacce di dialogo dei diversi utenti del portale e sui meccanismi di feedback, che contribuiranno ad arricchire il patrimonio informativo.

Si possono individuare le attività principali logicamente consequenziali, di natura piuttosto differente, ma fortemente connesse nei contenuti, che costituiscono i temi principali della ricerca di questa annualità e delle successive, che abbracciano l'intero progetto:

- I. Raccolta e riordino delle informazioni di base disponibili e analisi preliminare del patrimonio edilizio del contesto;
- II. Impostazione ed esecuzione delle attività di rilievo;
- III. Sviluppo e attuazione di una rete di sensori innovativi;
- IV. Definizione e sperimentazione di un protocollo di studio e rappresentazione su base geografica del patrimonio edilizio pubblico;
- V. Definizione e sperimentazione di un protocollo di studio e rappresentazione su base geografica del patrimonio edilizio;
- VI. Definizione e sperimentazione della struttura e dei contenuti di un Abaco geografico degli elementi tipologici;
- VII. Progetto della struttura e realizzazione della architettura informatica *beta* per la rappresentazione e condivisione via web;
- VIII. Sperimentazione dello strumento di comunicazione, tramite l'impostazione di un processo partecipativo su base locale;
- IX. Realizzazione di una versione fruibile dello strumento di comunicazione e redazione finale dei protocolli e delle procedure.

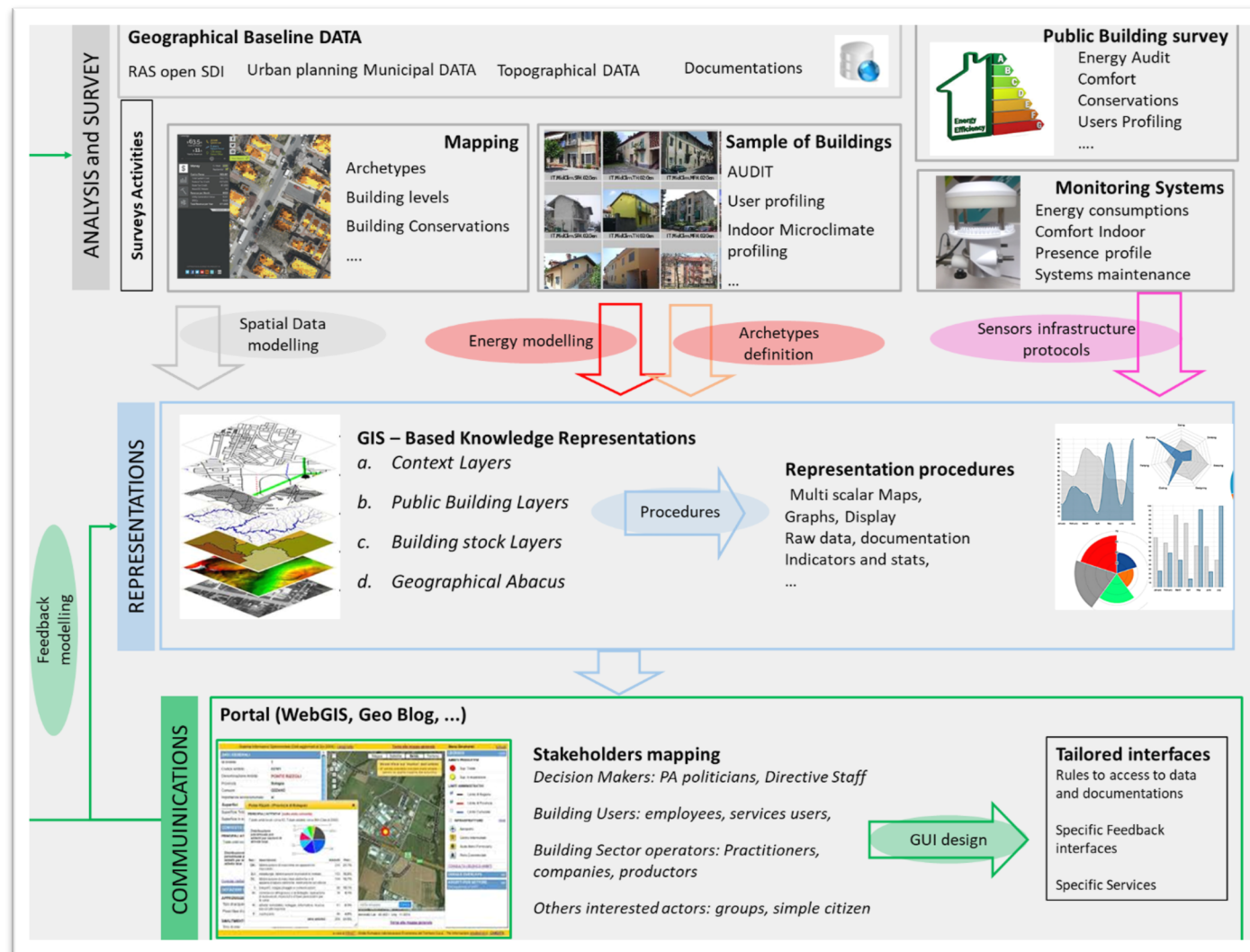


Figura 3.2. Articolazione consequenziale della ricerca.

3.4 Fase di analisi preliminare e layers del contesto

La fase di analisi del materiale informativo è di carattere preliminare e si basa sulla raccolta e lo studio dei dati territoriali e della documentazione disponibile, al fine di individuare le possibili caratteristiche ricorrenti del patrimonio edilizio, gli edifici da utilizzare come campione e le successive attività di rilievo.

Oltre allo studio dei dati disponibili direttamente legati al patrimonio edilizio, si riporta in tabella 3.1 la sintesi di alcuni layers descrittivi del contesto. Si tratta di un insieme informativo aperto, in cui la dimensione spaziale facilita l'aggiunta di nuovi temi anche legati ad altri aspetti del sistema urbano. Partendo dalle infrastrutture di dati spaziali generalmente disponibili nel contesto regionale sardo, i layer spaziali, che potrebbero essere integrati nel portale, sono relazionati a un loro possibile utilizzo nella determinazione del potenziale (teorico, tecnico, sfruttabile) delle innovazioni tecnologiche.

In questa sede non si potranno eseguire le stime del potenziale di tutte le tecnologie, ma si prepareranno alcuni dati di base utili allo scopo ed eventualmente si svilupperanno alcuni esempi, lasciando a successivi sviluppi della ricerca un approccio analitico strutturato alla tematica.

Tabella 3.1. Alcuni dati spaziali del contesto col il loro possibile uso.

Layer di contesto	Possibile uso	Fonte
Beni storico culturali e paesaggistici	Individuazione spaziale dei vincoli normativi all'uso di alcune tecnologie di retrofit energetico: pannelli solari, cappotti esterni, nuovi volumi	Amministrazione comunale RAS - GEODB
Protezione ambientale		Amministrazione comunale RAS - GEODB
Zonizzazioni urbanistiche PUC, PPCS, vincolistica		Amministrazione comunale
Dati socio economici	Stima di opportunità e vincoli di natura culturale ed economica	ISTAT
DTM – DSM	Studi di visibilità per impatto paesaggistico di alcune soluzioni tecnologiche Irraggiamento solare e stima del potenziale tecnologie solari	RAS - GEODB

3.5 Layer del patrimonio edificato

Questo contenuto informativo costituisce il principale mezzo di interazione con la cittadinanza, in quanto tutti i proprietari (o occupanti) degli immobili possono teoricamente essere interessati. Anche la PA può utilizzare questo contenuto per supportare la redazione di programmi di recupero e riqualificazione urbana orientati all'efficientamento energetico. Lo scopo del layer è quello di definire lo stato attuale del patrimonio tramite un approccio tipologico e limitate attività di rilievo.

Nei contenuti informativi inerenti il patrimonio edificato sono rappresentate le caratteristiche salienti dello stato attuale del patrimonio edilizio, principalmente rispetto agli aspetti prestazionali del sistema edificio impianto, ma sono previsti altri contenuti informativi di interesse per il recupero ed efficientamento quali, per esempio la distribuzione e l'uso del patrimonio, la consistenza fisico materica, i caratteri tipo morfologici, la qualità architettonica.

Il cuore di questo tematismo è lo sviluppo di un approccio di UDEM che supporti la definizione degli aspetti prestazionali del patrimonio, fornendo un motore di calcolo per simulare scenari alla scala del singolo edificio e/o per gruppi. Una delle peculiarità di questa ricerca è l'integrazione tra una metodologia per lo sviluppo di un UDEM e la realizzazione di un Abaco Geografico, orientato a fornire linee guida per gli interventi di efficientamento energetico e recupero sostenibile del patrimonio edilizio. I due strumenti condividono lo studio per la definizione degli approcci tipologici e la caratterizzazione degli elementi che lo compongono.

La struttura dovrà supportare l'interazione con almeno tre tipologie di utenti del portale (figura 3.3): i proprietari degli edifici, che ricercano suggerimenti per intervenire, la PA, che necessita di dati aggregati e di uno strumento di supporto per la pianificazione urbana, e il generico utente.

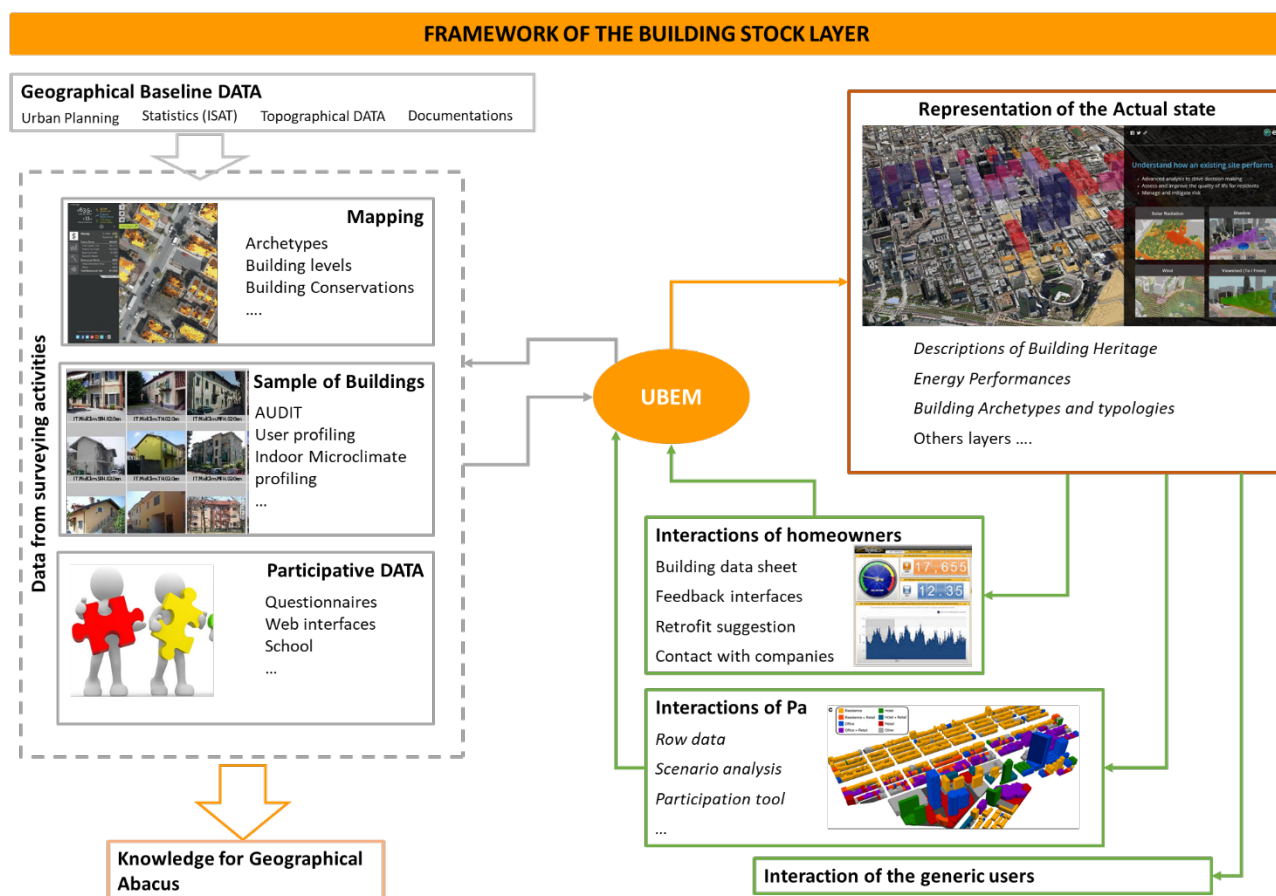


Figura 3.3. Schema generale del layer del patrimonio edilizio.

Riassumendo quanto già esposto nello stato dell'arte, vi sono diversi tipi di approcci per l'impostazione di un UBE (bottom – up ingegneristici, statistici o misti) che richiedono lo sviluppo dei seguenti aspetti: la definizione dei dati di ingresso disponibili e delle attività di rilievo compatibili con le risorse, impostazione di un approccio tipologico coerente con il modello energetico adottato, la definizione di una procedura di validazione del modello.

3.5.1 Dati topografici di ingresso

Lo stato dell'arte individua come dato di ingresso topografico minimo utile, per lo sviluppo di UBE alla scala urbana o di quartiere, un modello urbano con l'impronta al suolo dei corpi edilizi (LoD 0) o eventualmente provvisto della quota di base e della gronda (City Box model – LoD 1). La letteratura riporta strumenti che si basano su modelli geometrici più dettagliati (LoD 2-3) ricavati da rilievi LiDAR e laser scanner terrestre, che possono supportare raffinate procedure di analisi e rappresentazioni tridimensionali di sicuro impatto. Al fine di sviluppare una metodologia semplice ed economica, e perciò facilmente esportabile, in questo lavoro si propone di adottare come dato topografico un livello di dettaglio minimo generalmente disponibile anche per i centri urbani minori, in quanto comunemente utilizzato per le attività di pianificazione urbana e di gestione dell'attività edificatoria, e di prevedere alcune semplici attività di pre processing (CAD GIS) sia sui dati di ingresso topografici, che su quelli legati più propriamente alla modellazione energetica. Se le footprint degli edifici, estratte dalle basi topografiche disponibili, non contengono informazioni sulle quote sono richieste alcune attività di editing CAD per ottenere un City BOX model (LoD 1-2). La quota di base può essere ottenuta interpolando i punti quotati della mappa creando un Modello Digitale del Terreno (DTM – Raster 2.5d) con passo di precisione consona alle finalità dello studio (GRID 1x1m, o superiore). Il DTM sarà poi utilizzato per ricavare la quota di base dei corpi di fabbrica come media dei punti ricadenti nella footprint. In caso di mancanza delle quote di gronda, è necessario provvedere all'immissione manuale di nuovi dati, assegnando il numero di livelli fuori terra a ogni corpo di fabbrica tramite input manuale e poi ricavando la quota della gronda e l'altezza dell'edificio sulla base della l'altezza dell'interpiano definita per tipologia edilizia.

Nel caso di Carbonia si potrà fare affidamento sul Data Base Geo Topografico Multi Precisione (scale 1:500; 1:1000; 1:2000) della Regione Autonoma della Sardegna che individua i seguenti elementi [218]:

- UNITÀ VOLUMETRICHE (ST 02 TE 01 CL 01), con la quota di gronda e l'altezza del volume edilizio;
- EDIFICIO / UNITÀ EDILIZIA (ST 02 TE 01 CL 02), aggregazione di più volumi che individuano una funzione del fabbricato;
- PARTICOLARI ARCHITETTONICI EDILIZI (ST 02 TE 01 CL 03), tettoie e altri elementi accessori all'edificio;
- COPERTURA DELL'EDIFICIO (ST 02 TE 01 CL 04), tipologia di copertura dell'edificio.

3.5.2 Attività di rilievo

Nella fase di rilievo è necessario definire le attività necessarie allo sviluppo dello strumento, sulla base delle risorse e dei dati già disponibili, che, in via preliminare, possono essere dei seguenti tipi:

- Mappatura urbana: si tratta di informazioni che vengono ricavate tramite procedure semi automatiche o speditive attività di rilievo, generalmente svolte a copertura integrale degli edifici facenti parte dell'area di studio;
- Attività di recupero dati e caratterizzazione degli edifici campione a supporto della definizione delle tipologie edilizie e dei profili d'uso e per il recupero di dati per la valutazione dei modelli;
- Raccolta di dati di natura partecipativa, impostando una metodologia di animazione e coinvolgimento locale a supporto della definizione dell'approccio tipologico e/o per recuperare in maniera diretta alcuni dati mancanti a livello urbano.

3.5.3 Scelta dell'approccio tipologico

L'articolazione dell'approccio tipologico è strettamente legata al tipo di modello energetico che si vuole adottare e alle risorse disponibili per le attività di rilievo e per la modellazione stessa dell'archetipo. Il framework generale dello strumento prevede l'integrazione con un abaco geografico, perciò indirizza verso un approccio tipologico che riguarda la specificazione degli elementi ricorrenti degli involucri e degli impianti. Tale aspetto è fortemente compatibile con lo sviluppo di un approccio ingegneristico (o misto), ma non preclude l'uso di un modello di natura totalmente statistica. Sarà uno degli obiettivi primari della prossima fase di ricerca individuare nel dettaglio l'approccio alla modellazione e quindi la caratterizzazione delle tipologie edilizie. La caratterizzazione può riguardare non solo i dati sul sistema edificio impianto, ma anche i profili d'uso e di consumo che possono essere utilizzati come dato di ingresso per il modello energetico dell'UBEM (figura 3.4).

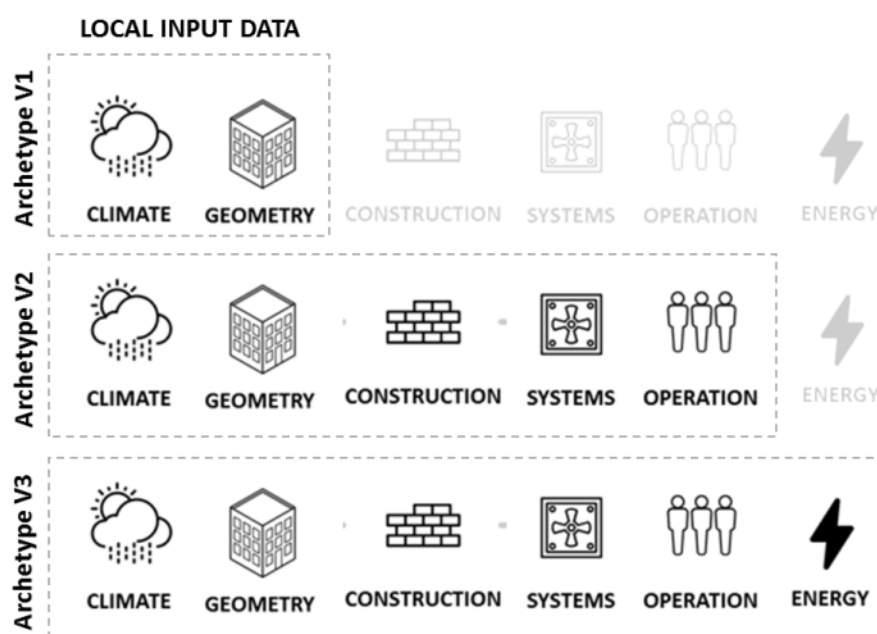


Figura 3.4. Esempio di informazioni che possono essere considerati in un approccio tipologico (adattata da [152]).

In tutti i casi, lo studio di un adeguato numero di edifici campione è la chiave di questa fase di definizione dell'approccio tipologico. Gli edifici campione sono fondamentali per raccogliere la base informativa necessaria per validare il modello rispetto a dati di consumo reale o derivanti da analisi di prestazione energetica, svolte col dettaglio del singolo edificio. Riassumendo lo studio si articola in alcune fasi consequenziali:

1. individuazione delle tipologie edilizie e dei suoi elementi ricorrenti sulla base dei dati disponibili e di conoscenza esperta (fase di classificazione);
2. selezione di un adeguato numero di edifici campione;
3. individuazione degli elementi da inserire nella caratterizzazione dell'approccio tipologico;
4. definizione delle procedure di assegnazione.

La prima fase della ricerca, i cui risultati saranno esposti nei capitoli successivi, è oggetto delle attività del presente anno. La prossima fase riguarderà l'individuazione di un adeguato numero di edifici campione da studiare, da cui dipende l'approccio tipologico adottabile. Il numero di edifici che si riusciranno a coinvolgere nel progetto, rispetto alla estensione completa dell'area di studio, può indirizzare verso diversi tipi di approcci alla modellazione. Nel caso di pochi casi studio, è preferibile un approccio archetipale, dove i casi studio servono come conferma alle ipotesi preliminari e si utilizzano profili d'uso standard e prevalentemente

modelli deterministici. In questo caso le indagini a campione potranno essere usate per la verifica e validazione del modello. Con l'aumentare del numero di casi studio, si possono definire profili d'uso personalizzati con metodi statistici, adottare modelli statistici o misti che sono capaci di risultati più affidabili e naturalmente effettuare procedure di valutazione e calibrazione del modello più accurate.

Il protocollo di studio per gli edifici campione dovrà essere individuato in maniera coerente con le risorse disponibili (tabella 3.2). In via preliminare si ritiene che lo studio possa essere sviluppato facendo riferimento alle procedure consolidate di audit energetico semplificato, eventualmente potenziato con alcune attività di rilievo microclimatico e questionari rivolti agli occupanti.

Tabella 3.2. Attività di indagine possibili.

Indagine	Possibile utilizzo per l'UBEM o per l'Abaco geografico
Audit preliminare	Indagini e verifiche per la tipizzazione delle strutture edilizie ed impianti Fenomeni di degrado ed obsolescenza
Raccolta bollette	Verifica di validità singolo edificio (su base annua)
Modellazione energetica (semi stazionaria o dinamica)	Verifica di validità singolo edificio (mensile / giornaliera) Verifica dei validità dei modelli analitici Impostazione di profili d'uso standard Sviluppo di un calcolo energetico per archetipo
Monitoraggio indoor	Calibrazione modelli energetici Definizione statistica di profili d'uso (settimanali, giornalieri)
Misure su componenti edilizi ed impianti	Indagini e verifiche per la tipizzazione delle strutture edilizie e impianti Fenomeni di degrado ed obsolescenza
Monitoraggio consumi	Calibrazione modelli energetici Definizione statistica di profili d'uso (settimanali, giornalieri)
Questionario	Informazioni utili per impostare l'abaco geografico: abitudini d'uso, comfort percepito, tipologia di occupanti, volontà di investimento, etc.

3.5.4 Modellazione energetica e validazione

Considerando che gli obiettivi del progetto richiedono la possibilità di simulare l'effetto di innovazioni tecnologiche, il modello dovrà contenere una parte analitica eventualmente integrata con metodi statistici. Tale modello potrà essere svolto per tipologia edilizia e poi assegnato a tutta l'area di studio con opportuni algoritmi, oppure essere svolto per ogni edificio. La definizione dell'algoritmo di calcolo e delle procedure di validazione sarà oggetto delle prossime fasi della ricerca: si potrà fare riferimento a procedure consolidate o sviluppare algoritmi propri più o meno complessi, considerando i seguenti aspetti:

- definire una procedura facilmente replicabile in altri contesti, limitando il carico computazionale;
- facilitare l'interpretazione dei risultati in modo da favorire la comunicazione con attori di diversa estrazione culturale;
- produrre dei risultati che siano visualizzabili alla scala del singolo edificio;
- supportare lo studio degli effetti di interventi di efficientamento energetico alla scala del singolo edificio;
- consentire l'attività di controllo e validazione del modello.

La validazione degli UBEM è una fase critica perché è spesso impossibile effettuare un controllo edificio per edificio, perciò essa avviene su più scale spaziali e temporali legate al tipo di modello energetico utilizzato. Altro elemento critico è il recupero del dato di confronto rispetto al quale validare il modello: esso può essere il valore di consumo reale oppure il fabbisogno simulato da un altro software già validato e/o noto per il calcolo alla scala del singolo edificio. Nel primo caso è perciò necessario recuperare i dati dei consumi che spesso sono noti solo per gruppi aggregati di edifici e non separati per servizio energetico. Talvolta si ricorre all'uso di software di controllo con procedure di simulazione consolidate, tuttavia anche in questo caso si devono superare alcune criticità:

- il software deve essere di speditivo utilizzo per simulare un congruo numero di edifici e di casi;
- il software ha dati di ingresso e procedure di calcolo differenti dall'UBEM, perciò il risultato potrebbe divergere notevolmente.

Le possibilità di validazione dipendono naturalmente dal tipo di modello energetico adottato e dai dati disponibili: alcuni autori ritengono sufficiente che i risultati abbiano un errore contenuto (+/- 20%) rispetto a dati noti di consumo di un gruppo di edifici per un arco temporale sufficientemente lungo (medie di consumi annui, o mensili), considerando non appropriato l'uso degli UBEM per calcoli su singoli edifici. Su tempi di osservazione e ambiti spaziali più ampi, gli approcci tipologici, che rappresentano le caratteristiche ricorrenti del patrimonio, riescono a simulare meglio gli andamenti mediati di insieme del patrimonio, ma falliscono aumentando il dettaglio spaziale o quello temporale. Nel caso non si abbiano dati dei consumi affidabili, la validazione può avvenire tramite software di controllo, che vengono utilizzati effettuando diverse simulazioni su edifici ideali, aventi gli stessi dati input utilizzati dall'UBEM, per valutare l'accuratezza dell'algoritmo, e su casi reali per valutare l'affidabilità generale della stima.

Nel nostro caso gli edifici campione saranno i casi su cui impostare la validazione del modello di calcolo su base giornaliera, mensile ed annua.

3.6 L'Abaco geografico

Il progetto di ricerca prevede lo sviluppo di un abaco delle strutture edilizie e delle tecnologie impiantistiche più diffuse nel contesto locale, integrato con uno strumento di UBEM. Esso non si configura come un semplice elenco di elementi comprendente la descrizione delle caratteristiche costruttive e quelle fisico-termiche, ma come una vera e propria linea guida a carattere locale per il recupero ed efficientamento del patrimonio, che comprende l'indicazione dei più diffusi fenomeni di degrado, le possibili soluzioni di recupero e risanamento, e le opportunità di incentivazione e finanziamento (figura 3.5). L'individuazione di soluzioni tecnologiche accessibili a livello locale può semplificare la fase di selezione degli interventi di retrofit, eliminando a priori soluzioni difficilmente reperibili o non adeguate al contesto, o alla tipologia di edificio. L'abaco contiene in larga parte i contenuti informativi del portale, e, grazie alle sue interfacce collegate al motore di calcolo dell'UBEM, si configura come un sistema di supporto alla definizione di strategie di efficientamento energetico, rivolto sia ai proprietari degli edifici sia alla PA. Per lo sviluppo dell'abaco geografico si possono individuare le seguenti tematiche:

- procedure di interazione con gli operatori del settore;
- sviluppo di efficaci interfacce di consultazione nel portale;
- definizione dei contenuti dell'abaco in maniera congruente con la caratterizzazione degli archetipi, legata alla esecuzione del calcolo energetico dell'UBEM e di supporto al protocollo per gli edifici pubblici.

L'abaco condivide con l'UBEM la fase di *urban mapping*, grazie alla quale le caratteristiche tipologiche degli edifici, e delle loro strutture e impianti, sono assegnate ai poligoni della mappa urbana. Questa è la fase cruciale, che assegna la dimensione spaziale dell'Abaco, che diventa appunto geografico. Tramite la rappresentazione su mappa, i proprietari possono accedere, con opportuno codice identificativo, alle schede del proprio edificio ed esplorare i dati precedentemente assegnati con criteri tipologici dall'UBEM. Tramite questa interfaccia, i proprietari potranno dare il loro feedback rafforzando i contenuti dei DB a supporto dello strumento e le interfacce di rappresentazione e gestione dei vari elementi. La scheda sintetica dell'edificio, accessibile direttamente dalla mappa, contiene tutti i collegamenti per risalire agli elementi edilizi e selezionare le ipotesi di retrofit; i contenuti di tale scheda sono direttamente legati alla caratterizzazione degli archetipi utilizzata per l'UBEM. Il DB di base può essere preliminarmente così articolato (figura 3.6):

- DB delle schede sintetiche degli edifici;
- DB delle tipologie edilizie;
- DB delle strutture dell'involucro;
- DB degli impianti;
- DB delle tecnologie di retrofit per ogni elemento del sistema edificio impianto;
- DB dei vettori energetici.

L'Abaco geografico è uno strumento di supporto che, con l'inserimento di alcuni dati di ingresso, può fornire linee guida per il miglioramento della efficienza energetica e del comfort interno del singolo edificio. La definizione delle metodologie e degli algoritmi che, partendo dai parametri di efficienza calcolati dal modello per ogni edificio, ne permette l'aggiornamento e suggerisce le ipotesi di intervento, è uno degli argomenti centrali di questo progetto. La selezione delle ipotesi di retrofit può essere basata su comprovati criteri tecnico economici, oppure utilizzare metodi che considerano altri criteri di diverso genere.

Il framework può essere riassunto nelle seguenti fasi consequenziali (figura 3.6):

- Viene pubblicata la mappa energetica con i dati stimati dall'UBEM sulla base della procedura tipologica impostata;
- L'utente utilizza il portale col suo profilo e fornisce informazioni sul sistema edificio impianto e sul profilo d'uso;
- Il sistema adegua i calcoli di prestazione per l'edificio con le nuove informazioni ottenute e le mostra all'utente;

- Il sistema propone dei suggerimenti per interventi di efficientamento energetico e miglioramento di comfort interno basati sul feedback qualitativi ottenuti e sulle caratteristiche specifiche dell'edificio.

L'abaco può contenere soluzioni impiantistiche tipo, calibrate in base a dei parametri di ingresso quali:

- la tipologia edilizia;
- la stratigrafia delle strutture dell'involucro;
- l'anno di costruzione;
- la tipologia di intervento di retrofit che si intende intraprendere (leggera o pesante);
- la disponibilità economica all'investimento legata alle possibili misure economiche di recupero della spesa;
- la tipologia di utenza in termini di numero, ore di uso dell'immobile e aspettative di comfort;
- la possibilità di installare FER.

Avere delle soluzioni codificate, che possano rispondere all'80% delle esigenze dell'utenza, permette un orientamento consapevole dell'utente, di progettisti e installatori, che possono specializzarsi sulle singole tecnologie, adeguando i costi e la progettualità agli ambiti specifici.

L'accessibilità dell'abaco anche all'utente finale e la raccolta dei dati relativa al suo immobile, insieme con un'analisi dei sistemi di miglioramento proposti, che riguardano l'involucro e il sistema impiantistico, permetterebbe anche di fare una scelta sul tipo di intervento da effettuare o programmare, nel tempo, per recuperare il proprio patrimonio edilizio.

Il fine dell'abaco è quello di creare una consapevolezza nell'utente finale relativamente alle potenzialità del proprio immobile e alle possibilità di efficientamento, ma non è da sottovalutarsi la ricaduta economica e occupazionale per tecnici o installatori, che possono costruirsi uno stato dell'arte e una professionalità specifica su alcune tipologie di intervento già valutate come tecnicamente valide a monte.

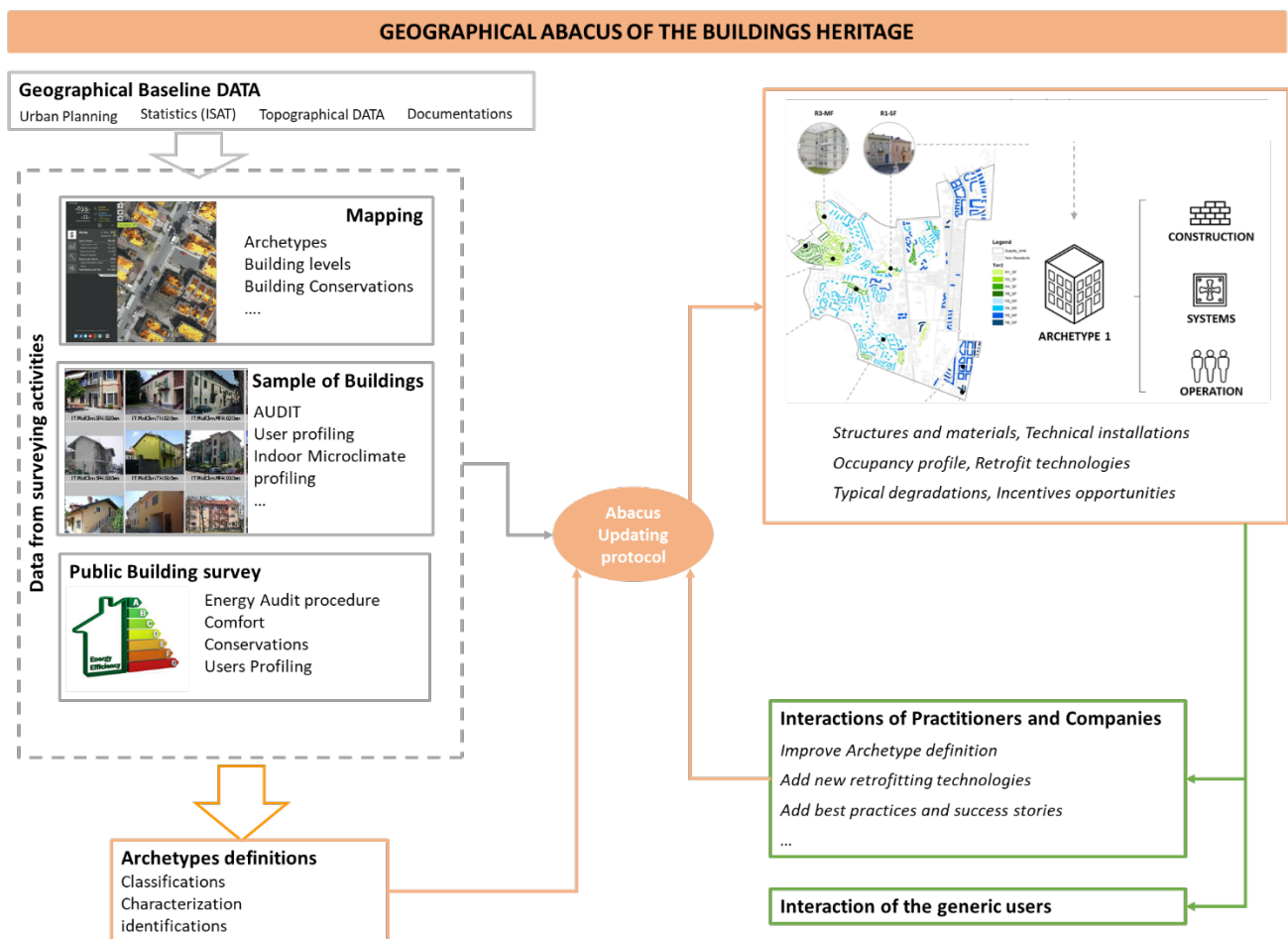


Figura 3.5. Framework generale dell'Abaco geografico.

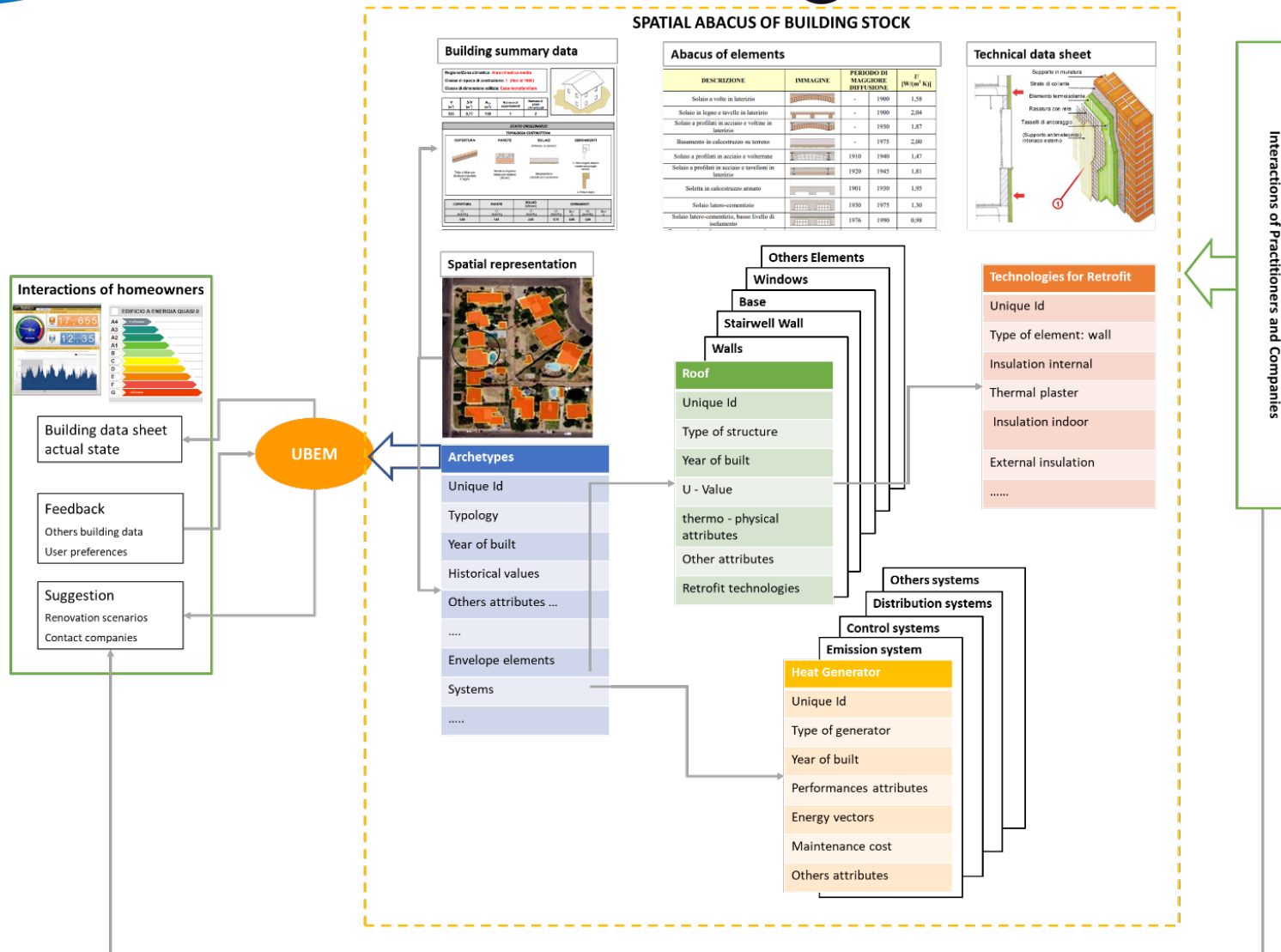


Figura 3.6. Articolazione dei DB di base dell'abaco e relazione con L'UBEM e l'interfaccia dei proprietari e degli operatori del settore.

3.7 Layer del Patrimonio Pubblico

Gli edifici pubblici sono sede di servizi di pubblica utilità e sono in genere portatori di valori maggiori rispetto agli edifici del resto del patrimonio. I gestori degli immobili e i Decision Makers (DM) della PA necessitano di un quadro affidabile delle opportunità di recupero ed efficientamento energetico del patrimonio pubblico, in modo da pianificare gli interventi valutandone le priorità. Sebbene sia possibile individuare una certa ricorrenza nelle apparecchiature costruttive e nei sistemi impiantistici legati agli anni di costruzione e alle destinazioni d'uso, gli edifici pubblici sono caratterizzati da profili d'uso e casistiche più variabili rispetto al patrimonio residenziale, che difficilmente possono essere gestiti con un approccio tipologico. Perciò, in questo caso, non sembra possibile prescindere da un approccio conoscitivo diretto basato su un audit energetico e protocolli di monitoraggio.

Negli edifici pubblici il decisore può essere, o non essere, un regolare utilizzatore dell'edificio e dei suoi ambienti. Nei casi più comuni gli utilizzatori degli edifici non sono coinvolti nella scelta delle azioni di retrofit energetico, ma probabilmente dovranno adottare comportamenti adattivi per il loro corretto utilizzo. Molti interventi di efficientamento sono collegati al profilo di utilizzo dell'edificio e degli ambienti, perciò il coinvolgimento degli utenti nella scelta degli interventi può essere un elemento chiave per migliorarne l'efficacia e promuovere comportamenti più responsabili. Il coinvolgimento degli utilizzatori dell'edificio può essere inoltre utile per confrontare i parametri di qualità dell'ambiente interno misurati strumentalmente con quelli percepiti, in modo da individuare priorità di intervento basate sull'uso reale degli ambienti.

Gli edifici pubblici sono inoltre una occasione privilegiata per realizzare casi studio esemplari, per sperimentare nuove tecnologie di efficientamento energetico e diffondere buone pratiche del processo di progettazione e attuazione degli interventi e di gestione dell'edificio, orientate anche alla trasparenza e al coinvolgimento della cittadinanza.

Il progetto prevede lo sviluppo di alcuni casi studio scelti tra gli edifici pubblici della città di Carbonia, sulle seguenti tematiche (figura 3.7):

- sviluppo e sperimentazione di un nuovo strumento per la gestione trasparente del patrimonio pubblico, basata sullo sviluppo di un Sistema Informativo Territoriale (SIT) dedicato con interfaccia web (WEB GIS);
- sviluppo di metodologie e strumenti a supporto al processo di efficientamento e gestione energetica dell'edificio, basati sulla integrazione di approcci BIM e sistemi di sensori per gli edifici.

Relativamente al primo punto, l'informazione spaziale alla base del portale dovrà contenere la classificazione tipologico funzionale del patrimonio edilizio pubblico, orientata a esplicitare gli aspetti relativi all'efficienza energetica e al recupero qualitativo, a titolo di esempio:

- informazioni sulle tecniche costruttive e sugli impianti e stato di conservazione;
- spese annue per manutenzioni e consumi energetici;
- visualizzazione dinamica dei dati misurati dai sensori;
- altre informazioni di interesse.

Relativamente al secondo punto, l'obiettivo è definire e sperimentare su alcuni casi studio un protocollo unico che unisce le fasi del processo di recupero ed efficientamento di un edificio pubblico: la diagnosi energetica, il progetto e l'attuazione dell'intervento, e il monitoraggio e gestione dell'edificio. Questa tematica riguarda lo studio dei seguenti aspetti:

- sviluppo di un approccio di audit energetico coerente con le normative e gli standard vigenti ma adeguato alle risorse disponibili ed ai valori del contesto;
- definizione del ruolo dei sistemi di monitoraggio e *Building Automation* nella procedura;
- sviluppo di un approccio BIM.

Un aspetto di interesse nel dibattito disciplinare è la definizione di una procedura di collegamento tra l'informazione geografica, tipicamente gestita con strumenti GIS, e quella relativa al singolo edificio, che entra nel campo del BIM. In particolare è necessario definire il tipo di dati, il livello di dettaglio adottato per

la rappresentazione degli elementi edilizi e come questi due strumenti si integrano con la modellazione a supporto della valutazione nelle ipotesi di retrofit energetico.

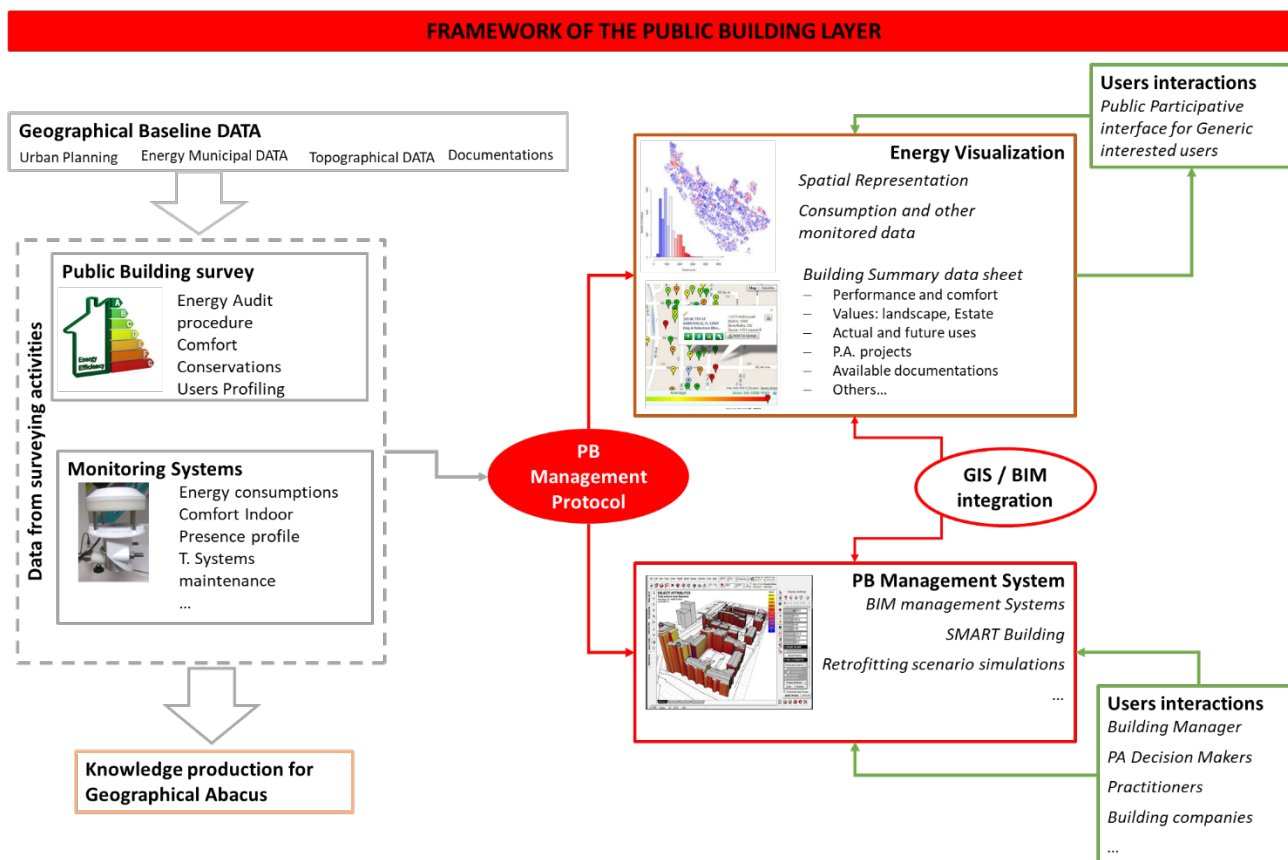


Figura 3.7. Schema logico del funzionamento del layer degli edifici pubblici.

I limiti conoscitivi che affliggono il patrimonio costruito nazionale dovranno necessariamente essere oggetto, in futuro, di attenta riflessione in occasione dell'avvento delle tecniche digitali per la progettazione, costruzione e gestione degli edifici, anche, e soprattutto, nel caso di intervento sull'esistente. Il D. Lgs 50/2016 [219] con le successive modificazioni e integrazioni, prevede che negli appalti pubblici "le stazioni appaltanti possono richiedere per le nuove opere nonché per interventi di recupero, riqualificazione o varianti, prioritariamente per i lavori complessi, l'uso dei metodi e strumenti elettronici specifici di cui al comma 1, lettera h). Tali strumenti utilizzano piattaforme interoperabili a mezzo di formati aperti non proprietari, al fine di non limitare la concorrenza tra i fornitori di tecnologie e il coinvolgimento di specifiche progettualità tra i progettisti". Con apposito decreto attuativo [220] sono stati definiti i tempi e le modalità dell'introduzione di tali strumenti che, in maniera sintetica, ma non esaustiva, possono essere catalogati come BIM. In particolare, il testo sancisce, per le stazioni appaltanti, che "il capitolato, allegato alla documentazione di gara per l'espletamento di servizi di progettazione o per l'esecuzione di lavori o della gestione delle opere, deve contenere:

- i requisiti informativi strategici generali e specifici, compresi i livelli di definizione dei contenuti informativi, tenuto conto della natura dell'opera, della fase di processo e del tipo di appalto;
- tutti gli elementi utili alla individuazione dei requisiti di produzione, di gestione e di trasmissione ed archiviazione dei contenuti informativi, in stretta connessione con gli obiettivi decisionali e con quelli gestionali. In particolare, deve includere il modello informativo relativo allo stato iniziale dei luoghi e delle eventuali opere preesistenti".

Di evidente rilevanza l'ultima frase in cui si obbliga la stazione appaltante, nel caso di interventi sul costruito, a dotarsi del modello informativo di quanto preesistente. Ovvero, detto in altri termini, sarà finalmente prassi comune quella di costruire, per il patrimonio, l'AIM (Assett Information Model) [221]. Tale obbligo consentirà, infatti, di avere importantissime informazioni sull'edificio, almeno pubblico. La costruzione del modello informativo, dal punto di vista del miglioramento prestazionale, presenta almeno due vantaggi. Il primo è quello di poter avere catalogate le informazioni necessarie a prendere decisioni in merito agli interventi da eseguire, a patto che il modello venga realizzato con un livello di dettaglio e informativo sufficiente. In secondo luogo, la digitalizzazione di tali informazioni consentirà tutta una serie di operazioni di confronto, estrapolazione, campionamento in maniera molto più completa di quanto non possa essere fatto attualmente in ragione anche di un maggior numero di dati disponibile. Il passaggio al digitale può sembrare più rivoluzionario di quanto in realtà non lo sia.

Sperando in una completa e celere applicazione della normativa, è probabile che in un futuro non molto lontano, gli attuali limiti conoscitivi saranno finalmente risolti, almeno per quanto riguarda l'edilizia pubblica. Il presente progetto di ricerca vuole, in tal senso, dare un contributo significativo, utilizzando la procedura BIM per l'audit energetico del sistema edificio impianto attraverso la creazione di un apposito modello informativo, che sia capace di gestire informazioni relative alle indagini di archivio dell'edificio as built, informazioni relative alle indagini strumentali *una tantum*, che possono essere realizzate per caratterizzare l'involucro e gli impianti dal punto di vista prestazionale, infine, informazioni rilevate in *real time* dai dispositivi di building automation da testare, che acquisiranno informazioni istantanee su consumi energetici, condizioni ambientali interne e profili di utilizzo.

3.8 *Sviluppo di una rete mesh di sensori innovativi*

Anche se il mercato offre diverse tecnologie di misurazione dei consumi SMART e di sensoristica dedicata alla misura della qualità dell'ambiente interno per uso domestico, risulta ancora difficile pensare a uno scenario di capillare diffusione di sistemi di monitoraggio e di condivisione del patrimonio informativo, a causa della mancanza di un protocollo comune di scambio dati e degli, ancora non risolti, conflitti con la normativa di tutela della privacy. Inoltre permane, per gli strumenti di uso domestico, un problema di affidabilità, completezza e precisione delle misure.

Tra gli obiettivi del presente progetto vi è quello di sviluppare una rete di sensori e di sperimentare protocolli di trattamento dati adeguati a supportare i processi di recupero ed efficientamento del patrimonio edilizio. Si identificano preliminarmente due finalità generali della infrastruttura: la prima fa riferimento principalmente agli approcci di Energy Visualisation, la seconda si riferisce alle tecnologie relative allo SMART Building e Building Automation.

L'infrastruttura è pensata principalmente per l'uso negli edifici pubblici, dove i valori in gioco e le risorse disponibili possono giustificare l'investimento in strumenti di monitoraggio e controllo. Tuttavia l'architettura potrebbe essere scalata e semplificata anche per uso sul residenziale, e a tal fine si rende necessario definire reti con componentistiche di facile reperimento e installazione, per favorirne la replicabilità, e chiare procedure di trattamento dati, che ne permettano l'archiviazione e la diffusione nel rispetto delle normative sulla privacy.

La definizione della architettura della rete e l'individuazione dei parametri monitorati dovrà perciò tenere conto del fatto che l'informazione raccolta ha due finalità principali:

- la sensibilizzazione e diffusione di buone pratiche nel contesto locale, tramite la condivisione aperta e dinamica (ossia aggiornata in maniera automatica) dei dati misurati (o di una loro elaborazione sintetica), attraverso una specifica interfaccia di condivisione su base spaziale integrata nel portale dello strumento di comunicazione, orientata a un utente non necessariamente tecnico;
- la raccolta e la gestione di dati utili a supportare il processo di diagnosi e progetto dell'efficientamento energetico e migliorarne la fase di gestione, tramite approcci integrati con i protocolli BIM, che possono essere utilizzati da i gestori degli edifici e da tecnici incaricati.

Gli edifici pubblici e privati sono stati tra i primi destinatari dell'implementazione dell'IOT realizzata mediante l'utilizzo di dispositivi, di reti di sensori e più in generale della diffusione di tecnologie SMART. Lo sviluppo di tali tecnologie ha portato alla creazione di numerosi prodotti e di protocolli di comunicazione che trovano applicazione nell'utilizzo di reti di comunicazione dati attraverso sia sistemi cablati sia sistemi wireless, all'interno degli SMART Building.

La scelta di utilizzare sistemi cablati oppure sistemi wireless per la realizzazione di un'infrastruttura di rete discende dalla valutazione di numerosi aspetti; tra i più rilevanti vengono generalmente considerati: la sicurezza del sistema con riferimento a possibili intrusioni non autorizzate da parte di terzi; l'affidabilità dell'infrastruttura in termini di continuità di funzionamento; la velocità di trasmissione dei dati; i costi da sostenere per la realizzazione e la manutenzione del sistema; l'utilizzo di energia per il suo funzionamento; l'interoperabilità del sistema, vale a dire la sua capacità di scambiare e di utilizzare informazioni con altri sistemi in comunicazione con esso. Con riferimento a tali aspetti, tra i sistemi wireless, definiti anche Wireless Sensor Network (WSN), sono tipicamente ricomprese le reti mesh (anche definite reti many to many), che sono infrastrutture facilmente scalabili, vale a dire adattabili in base alla tipologia e al volume di dati trattati, a motivo del fatto che la loro installazione richiede configurazioni di ridotta complessità, consentendo anche la loro agevole modificazione o estensione; anche il costo da sostenere per la loro realizzazione appare notevolmente inferiore rispetto alle classiche soluzioni cablate. Le principali problematiche da affrontare riguardano invece la loro continuità e velocità di funzionamento nonché la sicurezza. In tema di continuità di funzionamento e con riferimento all'ambito degli edifici pubblici e privati, tali sistemi possono risultare maggiormente inclini a subire interruzioni di connessione perché possono risentire dell'influenza di

dispositivi elettronici posizionati nelle vicinanze, così come di muri, pavimenti, armadi e porte presenti nell'edificio; ciò può influire sulla loro affidabilità e sulla velocità di connessione, che può dunque risultare inferiore rispetto ai sistemi tradizionali cablati. Anche la sicurezza può costituire una problematica da affrontare, con particolare riferimento all'intromissione non autorizzata di terzi, che potrebbe avvenire in assenza di una connessione fisica alla rete, condizione viceversa indispensabile nei sistemi cablati. Per quanto concerne la struttura generale delle reti mesh, questa è caratterizzata da un insieme di dispositivi che sono in comunicazione tra loro. Nello specifico, tali dispositivi risultano collegati all'interno di una maglia (mesh per l'appunto) di nodi, la cui conformazione assicura il costante funzionamento dell'infrastruttura, mediante la scelta di percorsi di trasferimento dei dati alternativi, realizzati secondo la modalità *flooding* (mediante il coinvolgimento di tutti i nodi della rete, in maniera indistinta) o secondo la modalità *routing* (mediante l'invio dei dati solamente ai nodi prescelti per garantire la migliore velocità, efficienza e affidabilità del sistema). Un ulteriore aspetto che assume primaria importanza riguarda la scelta dei protocolli più idonei per l'individuazione dei nodi attivi o da attivare, al fine di consentire la più agevole comunicazione tra gli stessi e dunque il trasferimento dei dati.

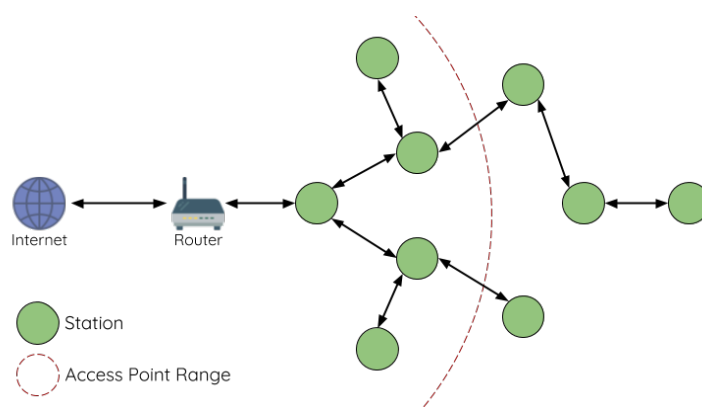


Figura 3.8. Schema della rete WSN.

Al fine di ridurre i costi relativi alla modifica dell'infrastruttura, si scelgono soluzioni wireless sempre più performanti in termini di copertura e di consumi energetici (figura 3.8). Oggi esiste un'ampia varietà di protocolli concorrenti che rendono di fatto complicata l'individuazione di un protocollo che possa essere ritenuto ottimale per tutte le tipologie di utilizzo, ma piuttosto che sia capace di garantire prestazioni eccellenti per specifiche applicazioni nell'ambito IOT.

Le tecnologie che verranno considerate nell'ambito del progetto di ricerca per la realizzazione di una rete di sensori a basso costo e a basso consumo energetico saranno di tipo wireless e rientrano tra quelle "a corto raggio" (ZigBee, Z-Wave, BLE) e "a lungo raggio" (LoRa, NB-IOT). La crescente riduzione dei costi di realizzazione e di funzionamento delle reti di sensori di tipo mesh negli edifici ne consente l'utilizzo non solo in contesti pubblici, ma anche privati, con strutture composte da client (dispositivi connessi a Internet), router (controllori di traffico dati in entrata e in uscita) e gateway. Lo studio delle reti di sensori per il monitoraggio dei parametri ambientali, di comfort ed energetici all'interno degli edifici, condurrà a appropriate scelte progettuali che tengono in conto sia del costo di realizzazione, sia dei consumi di energia elettrica. Una volta definite le specifiche del sistema di monitoraggio, verranno scelti e opportunamente programmati i dispositivi (sensore e gateway) in modo da adattarsi alla topologia di rete mesh scelta, alla posizione reciproca dei nodi, ai vincoli logistici e ai ridotti consumi di energia elettrica. Inoltre, tenendo conto del fatto che tali dispositivi dovranno essere alimentati, per lungo tempo, con delle batterie, verranno integrate all'interno dei sensori le migliori tecnologie di Energy Harvesting per il recupero dell'energia ambientale (radio frequenza, radiazioni ottiche, vibrazioni etc), attualmente disponibili sul mercato ed eventualmente in fase di studio e sperimentazione.

3.9 Mappa preliminare degli utenti del portale

Le linee guida per l'implementazione dei PAES e un vasto numero di esperienze comunitarie indicano alcuni criteri per l'individuazione degli stakeholders coinvolti nei processi di transizione sostenibile del sistema insediativo, con i rispettivi ruoli e interessi specifici. Si possono definire attori interessati coloro che (tabella 3.3):

- hanno interessi direttamente coinvolti nella questione;
- le cui attività influiscono direttamente o indirettamente sulla questione;
- possiedono/controllano informazioni, risorse e competenze necessarie per l'elaborazione e l'attuazione della strategia;
- la cui partecipazione/coinvolgimento sono necessari per la riuscita dell'attuazione.

Le linee guida propongono una individuazione generale degli attori coinvolti, tuttavia semplificando in base alla loro influenza sul processo decisionale, si possono identificare tre principali gruppi di interesse forti, ossia direttamente coinvolti economicamente e nelle decisioni, caratterizzati da domande di informazione molto diverse e per i quali sono necessari interfacce e strumenti sviluppate in maniera specifica: i cittadini proprietari di immobile (proprietari); i decisori facenti capo alle PA di vario livello e competenza, ma in particolar modo quelle comunali; il mondo imprenditoriale e della finanza come le imprese di costruzioni, gli studi di progettazione e più in generale gli investitori. Si possono poi definire altri attori minori rispetto al processo decisionale, ma che hanno forte peso nell'indirizzo delle azioni politiche e nella sensibilizzazione della popolazione, come le associazioni o gruppi ambientalisti o i comitati di quartiere che a vario titolo possono partecipare al governo delle trasformazioni urbane.

3.9.1 Identificazione preliminare degli interessi dei gruppi di attori principali

Cittadino proprietario di immobile: l'interesse di questo gruppo può essere identificato nelle semplici richieste sullo stato del proprio immobile (energia, comfort), su interventi di miglioramento delle condizioni, e sul valore acquistato a seguito di riqualificazione. È altresì noto dalla letteratura che la consapevolezza delle attività che generano i propri consumi porta a una riduzione degli stessi tramite azioni di sostituzione della strumentazione inefficiente ed adattamento dei comportamenti (eco-feedback).

Decisori e PA: i decisori hanno necessità di definire un quadro organico della conoscenza del fenomeno, sia per poter affrontare direttamente il problema della efficienza energetica con politiche e piani particolareggiati specifici, che per poterla integrare nelle analisi e negli strumenti di governo del territorio anche di altra natura. In particolare servono metodologie e strumenti capaci di rappresentare lo stato attuale del patrimonio edificato della città e del fabbisogno di energia, in modo da definire piani e politiche di trasformazione urbana. Inoltre lo sviluppo di metodologie di feedback con gli utenti può realizzare un'efficace strumento per il monitoraggio in itinere e la valutazione ex post di politiche e programmi specifici o per piani di natura più generale.

Imprese e investitori: le imprese del settore hanno interesse a vendere i propri servizi ampliando la loro rete di possibili contatti, inoltre possono essere interessate a notizie riguardo le tipologie di clienti presenti in modo da orientare i loro investimenti. Le imprese, entrando nella rete del sistema informativo, possono essere direttamente contattati da potenziali clienti interessati a opere di riqualificazione energetica. Inoltre la possibilità di accedere a un set di informazioni piuttosto dettagliato riguardo l'immobile, in molti casi può limitare le spese per sopralluoghi e preventivi.

Agenzie di servizi energetici: queste società detengono l'informazione preziosa circa gli andamenti e gli stili di consumo, ma in linea generale non possiedono studi che mettano assieme i vari elementi che li determinano. Esse potrebbero essere interessate a conoscere le preferenze dei loro utenti in modo da ottimizzare il servizio rendendolo più efficace e minimizzare i costi.

Gruppi di interesse organizzato: questi gruppi sono caratterizzati da avere interessi generali sui temi della sostenibilità, della tutela del paesaggio e dello sviluppo socio economico, e mostrano volontà di

partecipazione ai processi decisionali che interessano la trasformazione della città anche su aspetti molto specifici.

Tabella 3.3. Attori coinvolti.

Attore	Interesse	Contenuto
Osservatori occasionali	Informazione, interesse personale al tema	Informazioni generali: tipologia di immobili, consumi medi per area della città, statistiche.
Gruppi di interesse organizzati	Informazione orientata alla partecipazione ai processi di vario tipo	Informazioni generali: tipologia di immobili, consumi medi per area della città, statistiche con informazioni anche tecniche.
Occupanti	Monitoraggio dei propri consumi (istantanei e di lungo periodo) Monitoraggio dei propri costi Indicazioni su possibilità di miglioramento del grado di comfort (soluzioni tecniche e consigli) Indicazioni su possibilità di diminuire i propri consumi (soluzioni tecniche e consigli) Uso delle energie rinnovabili	Accesso a statistiche e informazioni generali.
		Grafici e schemi per visualizzare l'andamento dei consumi reali (su base mensile, stagionale, archivio). Visualizzazione di consumo in kWh, unità di combustibile, CO ₂ emessa, spesa.
		Grafici e schemi per confrontare il proprio andamento dei consumi con un trend di riferimento teorico (calcolato analiticamente) e mediato su edifici simili.
		Contenuti informativi circa le soluzioni tecniche possibili per il risparmio energetico e l'uso di FER.
		Contenuti informativi circa i consigli comportamentali per il risparmio energetico.
		Modulo per la richiesta di consulenza a imprese e studi tecnici.
Imprese	Vendita dei propri servizi Informazione, interesse personale al tema	Accesso a statistiche ed informazioni generali. Su invito dei proprietari accesso ad una scheda tecnica dell'edificio che ne riporta le caratteristiche salienti: struttura, impianti, consumi, tipo e numero di abitanti. Modulo per l'invio di preventivi, studi di fattibilità, ed offerte commerciali ai residenti che avessero accettato il servizio.
Agenzie di servizi energetici comunali	Miglioramento del servizio reso, pianificazione della gestione del servizio informazione, interesse personale al tema	Accesso a statistiche e informazioni generali. Possibilità di fornire consigli comportamentali e di comunicare con gli utenti del servizio.
Pianificatori comunali	Pianificazione delle trasformazioni urbane finalizzate al miglioramento dell'efficienza energetica e, più in generale, allo sviluppo sostenibile Informazione, interesse al tema	Accesso a informazioni generali e statistiche sulle caratteristiche degli immobili, degli utenti, dei consumi, e in particolare: mappe e documenti di sintesi utili alla lettura del fenomeno integrata con altri tematismi di pianificazione urbana; strumenti per la generazione di alternative progettuali e la loro valutazione comparata circa parametri ambientali/economici.
		Strumenti per la facilitazione della partecipazione attiva della cittadinanza nella definizione e valutazione delle alternative progettuali.

3.10 Schema preliminare della struttura del portale

Il portale sarà sviluppato su architetture “WEB-GIS GEO-BLOG”, basato su un Sistema Informativo Territoriale multi utente, preferibilmente su servizi in cloud e architetture informatiche open source. Lo strumento dovrà avere un’architettura scalabile in grado di replicarsi in altri casi studio con un minimo (o nullo) intervento degli sviluppatori. In generale il SIT dovrà supportare informazioni geografiche dinamiche in quanto, oltre a permettere la visualizzazione e l’interrogazione personalizzata dei dati spaziali, l’architettura informatica dovrà consentire l’inserimento di nuove informazioni e l’aggiornamento in tempo reale dei risultati secondo i privilegi dei diversi tipi di users. L’informazione geografica dovrà garantire la più ampia interoperabilità e rispondere agli standard di open data e, per quelli che ne avessero bisogno, ai requisiti di protezione della privacy.

Il portale sarà perciò strutturato con una Home dedicata al caso studio e una Home generale, che sarà poi utilizzabile per raccogliere portali simili sviluppati su altri casi. La Home dovrà contenere una mappa con alcuni tematismi, statistiche e indici riassuntivi, il Blog e l’interfaccia di accesso personale, da cui sarà poi possibile attivare i servizi legati al proprio profilo (figura 3.9).

Users del portale

Per una articolazione preliminare del portale, si possono individuare i seguenti users, articolati per livelli di accesso:

- *utenti generici (U1)*, possono visualizzare i contenuti aperti;
- *utenti loggati (U2)*, possono avere un proprio profilo, salvare e condividere visualizzazioni personalizzate dei contenuti aperti;
- *proprietari di edifici residenziali (U3)*, come U2; inoltre, con uno specifico codice accedono alla interfaccia dell’edificio per visualizzarne, personalizzarne, e modificarne i dati (entro certi limiti);
- *gestori di edifici pubblici (U4)*, come U2, inoltre con uno specifico codice accedono alla interfaccia dell’edificio per visualizzarne, personalizzarne, e modificarne i dati (entro certi limiti);
- *progettisti (U5)*, come U2, inoltre su, richiesta di U3 e U4, accedono alla scheda dell’edificio, alla interfaccia di gestione degli abachi e delle best practices;
- *imprese (U6)* e produttori di materiali e tecnologie (U7), come U5;
- *Pubblica Amministrazione (U8)*, come U2, inoltre accede ai dati inseriti nel portale, e tramite specifiche interfacce genera scenari per gruppi di edifici;
- *Amministratore (Ad_1)*, come U8, inoltre tramite specifiche interfacce aggiorna e modifica i contenuti del portale;
- *Sviluppatore (Ad_2)*, cura la gestione del portale e dei dati in esso contenuti.

Basi informative

A livello preliminare, si possono individuare i seguenti oggetti informativi su cui si basano i servizi del portale:

- il DB geografico del patrimonio edificato (DB_1), costituito da uno o più layer geografici (2D – 3D GML), collegato all’UBEM, con possibile collegamento con sensori, collegato all’interfaccia di gestione dell’edificio (S3), eventualmente collegato con il modello IFC dell’edificio;
- il DB geografico degli edifici pubblici (DB_2), costituito da uno o più layer geografici (2D – 3D GML), collegato a sistemi BIM (Standard IFC), collegato con sensori IOT, collegato con interfaccia di gestione dell’edificio (S4);
- il DB spaziale dell’abaco (DB_3), contiene schede di elementi del sistema edificio impianto interrogabili sia con interfaccia su base spaziale che con filtri e parole chiave. L’abaco contiene dati utilizzati dall’UBEM per effettuare i calcoli e generare gli scenari di retrofit, collegato alle interfacce di gestione dell’Abaco (S5);
- DB documentale (DB_4), altri DB di materiale documentale, non connesso con l’UBEM, organizzato secondo parole chiave e classificazioni pre impostate e interfaccia spaziale;
- DB geografico del contesto (DB_5), contiene informazioni su base spaziale non connesse con l’UBEM e l’abaco geografico; sono personalizzabili in visualizzazione;

- DB dei dati dei sensori (DB_6), dedicato agli edifici pubblici, connesso con lo sviluppo di una rete di sensori visualizzati su mappa;
- DB dei profili utente (DB_7), contiene dati degli utenti registrati e le pagine personali.

Servizi

I principali servizi si possono preliminarmente articolare per livello di complessità nei seguenti:

- *Interfaccia gestione profilo personale (S1)*: permette l'accesso al portale, il profiling dell'utente (inquadrato nelle tipologie sopra menzionale), la gestione dei dati utente, la scelta di alcuni parametri di privacy, l'attivazione di sezioni speciali delle interfacce basate sul profilo utente.
- *Interfaccia utente registrato generico (S2)*: l'accesso è dato a tutti gli utenti di almeno grado U2, permette di creare una pagina personale dove raccogliere e personalizzare la visualizzazione di elementi presenti nel portale, creare e condividere contenuti multimediali e geografici semplici, creare dei report;
- *Interfaccia gestione edificio privato (S3)*: l'accesso può essere effettuato da un U3 con un codice di ingresso. Al primo accesso il profilo è accoppiato a un edificio nella mappa (DB_1). L'interfaccia dovrà permettere di visualizzare i dati relativi all'edificio, inserirli e modificarli, effettuare simulazioni di scenari di retrofit e creare report, scegliere quali informazioni condividere su mappa, contattare imprese o professionisti, visualizzare i dati dei sensori (se presenti).
- *Interfaccia gestione edificio pubblico (S4)*: l'accesso può essere effettuato da un U4 con un codice di ingresso. Al primo accesso il profilo è accoppiato a un edificio nella mappa (DB_2). L'interfaccia dovrà permettere di visualizzare i dati relativi all'edificio, inserire dati, effettuare simulazioni di scenari di retrofit preliminare e creare report, dare accesso all'ambiente BIM condiviso (U5, U6, U7), gestire i protocolli BIG_P e Sen P.
- *Interfaccia gestione abaco geografico (S5)*: l'accesso può essere fornito alle imprese (U5, U6, U7), deve consentire di creare nuovi contenuti dell'abaco geografico, sia con inserimento spaziale che con il solo aggiornamento dei DB delle tecnologie, che diverranno opzionabili per effettuate le simulazioni con l'UBEM, creare report di tecnologie basate sulla selezione di alcune di esse.
- *Interfaccia generazione scenari urbano (S6)*: accesso consentito alla PA (U8), permette di creare scenari di retrofit su gruppi di edifici utilizzando l'UBEM. La selezione può essere fatta tramite filtri basati sulle caratteristiche degli edifici o su selezione manuale spaziale; crea mappe per edificio, statistiche complessive iniziali e post intervento, report sintetici dello scenario.
- *Interfaccia gestione del portale (S7)*: accesso consentito a utenti di livello almeno Ad_1, permette il download di dati complessivi e ordinati, la gestione dei contenuti del portale, la modifica delle sezioni e della documentazione.

Procedure speciali

Il SIT dovrà eseguire (lato server) alcune procedure di calcolo e trattazione dei dati relativi a UBEM, Protocollo di interoperabilità BIM IOT GIS (BIG_P), Protocollo di gestione dei sensori (Sen_P).

- *UBEM*: il modello di calcolo prevede l'esecuzione di diversi algoritmi di geo-processing e di operazioni standard su data base. Il portale mostrerà tra i dati spaziali alcuni risultati pre calcolati dal modello, ma i valori dovranno aggiornarsi sulla base dei dati inseriti dagli utenti (U3); inoltre il modello sarà utilizzato per effettuare le simulazioni di scenario (S3 S5);
- *Protocollo di interoperabilità BIM - GIS (BIG_P)*: è prevalentemente dedicato agli edifici pubblici, consiste in un protocollo di interoperabilità tra dato spaziale (2D – 3D GML), modellazione e gestione del BIM (IFC) e flusso di dati proveniente dai sensori;
- *Protocollo di gestione dei sensori (Sen_P)*: prevalentemente dedicato agli edifici pubblici, consiste in un protocollo di data harvesting, storage, management and visualization per i sensori, orientato alla visualizzazione dinamica dei valori su mappa e alla integrazione nel portale.

		<i>Utente generico</i>	<i>utente loggato</i>	<i>proprietario di edificio</i>	<i>gestore edificio pubblico</i>	<i>Progettisti</i>	<i>Imprese (edili, impiantistiche, ..)</i>	<i>Produttori di materiali</i>	<i>Pubblica amministrazione</i>	<i>Amministratore</i>	<i>sviluppatore</i>
	DB interessati	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	Ad_1	Ad_2
DB_1	<i>DB geografico del patrimonio edificato</i>	sola visualizzazione	S2 : visualizzazione e personalizzazione	S3: interfaccia di gestione	S2 : visualizzazione e personalizzazione	S2 : visualizzazione e personalizzazione S3: su richiesta di U3			S6: generazione scenari	S3 su richiesta	Controllo completo
DB_2	<i>DB patrimonio edificato pubblico</i>				S4: gestione edificio pubblico	S2 : visualizzazione e personalizzazione S4: su richiesta di U4			S4: gestione edificio pubblico	S4 su richiesta	
DB_3	<i>DB geografico dell Abaco</i>				S2 : visualizzazione e personalizzazione	S2 : visualizzazione e personalizzazione	S5: gestione dell'abaco			S5 su richiesta	
DB_4	<i>DB documentale</i>						S2 : visualizzazione e personalizzazione		S2 : visualizzazione e personalizzazione	S7: gestione portale	
DB_5	<i>DB_geografico del contesto</i>						S2 : visualizzazione e personalizzazione			S7: gestione portale	
DB_6	<i>DB_dati_sensori</i>				S4: gestione edificio pubblico	S2 : visualizzazione e personalizzazione S3 - S4 su richiesta			S4: gestione edificio pubblico	S4 su richiesta	
DB_7	<i>DB_pofili utente</i>	accesso alla S1	sola visualizzazione accesso alla S2	S1: pagina e profilo personale	S1: pagina e profilo personale	S1: pagina e profilo personale		S1: pagina e profilo personale	S7: gestione portale		

Figura 3.9. Schema della interazione tra utenti e DB informativi per l'esecuzione dei servizi.

Modifica contenuti	
inserimento dati	
personalizzazione	
misto	
sola visualizzazione	

3.11 Approccio partecipativo

Il progetto richiede un approccio partecipativo complesso costante, che in parte costituisce un elemento chiave per l'attuazione degli algoritmi della ricerca, in parte è necessario per la fase sperimentale (tabella 3.4). Accanto a queste attività di coinvolgimento, si possono affiancare attività di informazione aventi finalità più generali, che potranno dare origine a ulteriori e futuri servizi del portale, quali, a titolo di esempio:

- interfaccia per la promozione dell'operato e delle buone pratiche applicate dalla PA;
- interfaccia per la condivisione di possibili progetti o piani di efficientamento energetico e recupero;
- interfaccia per comunicare coi fruitori dei servizi.

Oltre all'obiettivo generale di sensibilizzazione alla tematica, i proprietari o occupanti degli edifici saranno coinvolti per la raccolta di dati necessari allo studio degli edifici campione.

Gli operatori del settore saranno coinvolti sia per valutare l'efficacia della struttura dell'Abaco geografico e delle sue interfacce d'uso, che per incentivare il flusso informativo continuo necessario all'aggiornamento dei contenuti.

Tabella 3.4. Attività partecipative legate allo sviluppo dello strumento.

Proprietari o occupanti delle unità immobiliari	
Obiettivo	Descrizione
<i>Studio sugli edifici campione</i> per l'impostazione dell'approccio tipologico dell'UBEM	Attività di Audit energetico Questionari guidati e interviste
<i>Sviluppo interfaccia</i> per la raccolta dati su base spaziale per l'ottimizzazione dell'UBEM	Questionari semplificati tradizionali e via web Eventi informativi
Operatori del settore	
Obiettivo	Descrizione
<i>Sviluppo interfaccia</i> per la consultazione e inserimento di nuovi contenuti nell'abaco	Selezione di un gruppo di operatori locali del settore e di esperti da coinvolgere nella definizione della struttura del portale e nella sperimentazione delle interfacce e contenuti.
<i>Sviluppo interfaccia</i> per il collegamento domanda offerta	
Responsabili dell'edificio	
Obiettivo	Descrizione
<i>Sviluppo interfaccia</i> per il supporto alle procedure di gestione e al processo di efficientamento	Selezione di un gruppo di responsabili locali e di esperti da coinvolgere nella definizione nella sperimentazione delle interfacce e dei contenuti.
<i>Raccolta dati</i> per la caratterizzazione dell'edificio pubblico	Attività di audit energetico Questionari guidati e interviste
User generico registrato	
Obiettivo	Descrizione
<i>Sviluppo di una interfaccia</i> , per la sensibilizzazione e il coinvolgimento	Selezione di un gruppo partecipanti di varia estrazione da coinvolgere nella definizione nella sperimentazione delle interfacce e contenuti.

4 Risultati e Conclusioni

L'attività di ricerca svolta in questo anno ha portato a tracciare il contesto teorico della ricerca e a definirne l'approccio metodologico generale. Dopo un discorso introduttivo sulla complessità del processo di recupero ed efficientamento energetico del patrimonio immobiliare, che ha portato a inquadrare le principali barriere alla diffusione delle nuove tecnologie, si sono presentati gli approcci del paradigma della SMART City e delle strategie Comunitarie.

Lo stato dell'arte è entrato poi più nel dettaglio degli approcci tipologici e nello sviluppo di strumenti di UBEM a supporto del processo urbano di recupero ed efficientamento del patrimonio edilizio. A tal riguardo si sono illustrati gli approcci ricorrenti attraverso una ricognizione della letteratura e si è sviluppata una metodologia analitica di studio che è stata utilizzata per alcuni casi specifici, che possono essere di indirizzo alla impostazione della metodologia riportati, in forma di scheda sintetica, nell'*Allegato 1* al presente documento. Dopo aver definito un quadro rappresentativo degli approcci più diffusi all'UBEM, viene descritto lo schema concettuale della metodologia che si intende sviluppare in questo progetto, esplicitandone per ogni parte i contenuti e i requisiti generali e sottolineando le criticità a cui la ricerca dovrà dare una risposta.

Infine si è presentato il caso studio di Carbonia (*Allegato 2* al presente documento), tramite l'analisi dei dati disponibili in formato OPEN, finalizzata a costruire la conoscenza di fondo, necessaria allo sviluppo del progetto e a individuare le principali criticità della baseline informativa del contesto.

4.1 Urban Building Energy Modeling (UBEM)

Lo studio più approfondito di alcuni approcci di UBEM, per quanto non esaustivo rispetto alla numerosità dei casi studio ormai presenti in letteratura, ha portato a individuare i punti fermi delle metodologie più recenti ricavate dall'analisi dello stato dell'arte. I casi studio di riferimento sono stati scelti cercando di selezionare gli approcci che, per scala geografica o rilevanza, fossero di interesse per l'impostazione del progetto, considerando sia esempi ad ampio respiro, evidentemente supportati da forti risorse di tipo economico e umane (MIT Cambridge), che casi studio sviluppati nell'ambito di esperienze legate a piccole realtà urbane o, ancora, legati al contesto universitario.

Tra questi, si sono analizzati alcuni esempi dei primi anni 2000 (Rylatt e Gadsen) sviluppati in ambiente GIS, caratterizzati da limitazioni di software e capacità di calcolo, parallelamente a esempi recenti che possono contare su reti di calcolatori dedicati molto performanti (UMI) e sulle tecniche di Cloud Computing (CITYBES). I casi studio mostrati sono caratterizzati da diversa complessità legata alle finalità degli studi, alle risorse disponibili e ai dati di base. Alcuni studi puntano a sviluppare strumenti complessi, capaci di gestire diverse esigenze del processo decisionale, legato alla definizione di strategie di efficientamento del patrimonio edilizio, e che adottano modelli di simulazione molto affidabili e dettagliati, e si basano su architetture software di nuova tipologia, sviluppate in maniera specifica. Altri hanno, invece, l'obiettivo di impostare strumenti semplici capaci di arrivare a risultati di una qualche utilità anche con un limitato impegno di risorse economiche e umane: esse sono generalmente basati su interfacce, eventualmente personalizzate, di strumenti già disponibili (GIS, WEBGIS) e implementano procedure più semplici, spesso dedicate solo ad alcuni aspetti del processo decisionale.

La maggiore disponibilità di capacità di calcolo, messa a disposizione dalle recenti tecnologie, dà maggior libertà nella definizione dei modelli, spostando su altri aspetti le criticità nello sviluppo degli UBEM, quali recupero e trattazione dei dati base, procedure di calibrazione e validazione dei modelli, visualizzazione e utilizzo dei risultati nei processi decisionali, sviluppo di interfacce e procedure semplici ed esportabili.

Per quanto riguarda i dati geometrici di ingresso riferiti all'ambiente urbano, molti approcci, anche quelli legati agli strumenti più raffinati, adottano modelli urbani semplificati (LoD 0-1), in quanto sviluppabili tramite procedure automatizzate da basi topografiche largamente diffuse.

Per quanto riguarda i dati di base relativi a strutture e impianti, diversi autori adottano approcci tipologici anche molto semplificati o non direttamente basati sul contesto urbano preso in esame. Alcuni casi più recenti adottano abachi di strutture e tipi edilizi sviluppati su base nazionale o sub nazionale, come quelli del progetto TABULA o quelli ricavabili da data base di tipo statistico. L'uso di studi tipologici già disponibili limita

i costi per la preparazione dei dati di base e, soprattutto, non rende necessarie attività di rilievo urbano che richiedono molto tempo e non mettono al riparo da semplificazioni ed errori umani. In questi casi il rischio di ottenere risultati poco rappresentativi del contesto locale discende dalle attività di calibrazione dei modelli, sulla base di dati di consumo reale resi disponibili dalle reti di gestione dei servizi energetici urbani o dai servizi nazionali, aggregati su base comunale o distrettuale, oppure sulla base di indagini a campione, che in questi ultimi anni sono diventate molto più semplici grazie alla diffusione degli SMART meters. A tal fine recenti procedure accoppiano modelli di simulazione energetica, talvolta eseguita per singolo edificio, a modelli statistici, finalizzati a rendere il dettaglio spaziale e temporale dei dati consumo reale disponibili, utilizzabili per le procedure di calibrazione e validazione. Tuttavia, anche riuscendo a ottenere una buona congruenza tra i risultati dell'UBEM e i dati reali su base aggregata (quartiere o città), il confronto alla scala del singolo edificio o di piccoli gruppi rimane ancora una criticità aperta.

Alcuni degli strumenti più recenti integrano interfacce e procedure, volte a facilitare la definizione e il confronto di scenari progettuali di efficientamento, alcune rivolte a un utente esperto altre, più semplici, sviluppate su portali web aperti per un uso condiviso. Con scopi meno ambiziosi, alcuni strumenti si limitano a finalità di trasparenza energetica e di sensibilizzazione della cittadinanza, sviluppando interfacce più semplici e approcci più leggeri e ripetibili. Rimane comunque un tema molto discusso l'efficacia, e perciò la diffusione, di strumenti di questo tipo all'interno di reali processi decisionali, che per ora rimane limitato ai "casi di eccellenza".

Uno dei temi centrali dei casi studio più recenti è lo sviluppo di metodologie e strumenti automatici o semi automatici, capaci di minimizzare i dati di ingresso richiesti, le attività di rilievo e di input manuale delle informazioni, nell'intento di standardizzare le procedure e limitarne i costi. A questo scopo sono stati sviluppati algoritmi per ricavare in maniera automatica le geometrie degli edifici ed effettuare anche una zonizzazione termica interna, mentre i dati fisico impiantistici degli edifici sono spesso ricavati da tipi edilizi semplificati, definiti su base sovra locale (TABULA).

Dal punto di vista dei partecipanti a un processo di definizione di politiche e di strategie per l'efficientamento energetico del patrimonio edilizio urbano, tale approccio, di fatto, si comporta in maniera simile ad una Black Box, prettamente gestita da operatori altamente specializzati. Spesso si rinuncia a impostare un accurato studio locale degli elementi ricorrenti del patrimonio edilizio, in favore della diminuzione dei costi e della replicabilità della metodologia, appoggiandosi poi alla calibrazione del modello sui dati reali. Tale approccio è certamente adatto ai sistemi urbani di maggiori dimensioni, tuttavia se lo scopo di questi strumenti è supportare la costruzione della conoscenza condivisa, perdere tale contributo informativo potrebbe limitare l'efficacia dello strumento stesso, in quanto è riconosciuto in letteratura che lo studio di soluzioni tipologiche standard a carattere locale può favorire la diffusione delle tecnologie di retrofit nel contesto. Si ritiene perciò che, soprattutto nel caso di contesti urbani non particolarmente estesi, l'impostazione di uno studio tipologico a carattere locale possa essere utile sia per impostare gli archetipi dell'UBEM, che anche per definire interventi di retrofit tipici locali.

4.2 *Approccio metodologico*

L'approccio metodologico proposto è coerente con la letteratura disciplinare, può essere inquadrato come uno strumento di supporto alla impostazione dei processi di coinvolgimento e di creazione della conoscenza condivisa costitutivo delle componenti soft della SMART City. Si tratta di uno strumento di SMART Planning in quanto coinvolge la dimensione strategica della Governance Urbana, è principalmente basato sul riutilizzo del patrimonio informativo aperto disponibile presso le istituzioni nazionali e presso l'amministrazione locale e integra anche moderne infrastrutture di sensoristica applicate agli SMART Buildings, finalizzate a completare il quadro conoscitivo e a garantirgli la dinamicità necessaria per supportare attività di monitoraggio, rivolte principalmente agli edifici pubblici. Si tratta di una metodologia rivolta a contesti di piccola e media dimensione, che costituiscono gran parte del patrimonio edilizio italiano e che possono essere caratterizzate da limitata disponibilità di dati di base e scarse risorse economiche ed umane.

L'impostazione della metodologia generale ha permesso di individuare le macro attività in cui articolare la ricerca nelle prossime due annualità e di stabilirne i contenuti disciplinari:

- *Definizione dei layers del contesto*, studio e rappresentazione degli elementi del contesto urbano che

- possono influenzare le possibilità di recupero sostenibile del patrimonio;
- *Definizione dei layers degli edifici pubblici*, con l'obiettivo principale di supporto alla PA nella gestione energetica di qualità dell'edificio e ai progettisti tramite linee guida e strumenti (BIM);
- *Definizione dei layers del patrimonio edificato*, dove il patrimonio edilizio viene rappresentato tramite approcci GIS nelle sue caratteristiche di efficienza energetica e di potenziale di recupero sostenibile tramite UBEM;
- *Definizione dell'Abaco Geografico*, che raccoglie e riordina la conoscenza sugli elementi ricorrenti del patrimonio edilizio su base spaziale, favorendone la diffusione multiutente;
- Sviluppo di una rete mesh di sensori innovativi, a supporto del processo di recupero ed efficientamento energetico del patrimonio edilizio pubblico tramite approcci di Energy Visualisation, SMART Building e Building Automation.

4.3 Analisi preliminare del caso studio di Carbonia

La presentazione del caso studio di Carbonia, basato sulla analisi preliminare del contesto, ha contribuito a individuare i punti di forza e le criticità dei dati disponibili, al fine di indirizzare le future attività di rilievo e analisi dei dati e la struttura stessa della metodologia. Tale studio si è concentrato su due finalità complementari, ma differenti: da una parte valutare la struttura e i contenuti della baseline conoscitiva, rivolta allo sviluppo dei dettagli della metodologia, e dall'altro iniziare a costruire la conoscenza del contesto per sintetizzare i contenuti disciplinari dell'Abaco Geografico. Nello specifico si è effettuata una valutazione sulla quantità e qualità dei dati disponibili ai fini della tipizzazione del patrimonio edilizio locale e alla impostazione dell'UBEM e dell'Abaco Geografico.

4.3.1 Dati geometrici

I dati geometrici di base sono riferiti alla forma dell'involucro esterno degli edifici ed alla loro localizzazione nell'ambiente urbano, possono principalmente essere desunti dal Data Base GeoTopografico (DBGT) dei centri urbani reso disponibili dalla Regione Sardegna per quasi tutti i nuclei dell'isola. Si tratta di una base topografica (in scala 1:2000 o più di dettaglio) strutturata coerentemente con le direttive INSPIRE che oltre alle impronta degli edifici contiene i dati sulle altezze (gronda, colmo, base) ed altri strati conoscitivi di utilità per gli studi sull'ambiente urbano. Tale base topografica è sufficiente ad impostare il City Box model (LoD 1) che costituisce l'informazione geometrica minima per lo sviluppo di un approccio di UBEM.

Il DBGT contiene una gran quantità di altre informazioni che possono essere utilizzate nell'ambito dello sviluppo di un UBEM e per lo sviluppo di altri studi anche con finalità non strettamente legate alla efficienza energetica. Tra tutti è di particolare interesse lo strato 03 dei numeri civici che contiene il DB spaziale di tutti gli indirizzi, utile per legare informazioni di diverso tipo eventualmente disponibili per unità immobiliare e sviluppare altri studi di estrazione multidisciplinare. Il SITR della RAS mette anche a disposizione i modelli digitali del terreno in formato Raster2.5d (DSM, DTM, DSM edifici) con griglie di diversa precisione (1m, 5m 10m)¹ che sono la base per la valutazione del potenziale delle tecnologie solari in ambito urbano esplicitandone il potenziale teorico, tecnico e sfruttabile. Per il comune Carbonia sono disponibili i modelli Raster con tutte le precisioni.

D'altro canto, le informazioni mancanti nel DBGT sono quelle relative alla articolazione delle proprietà e al numero e la destinazione d'uso delle unità immobiliari presenti all'interno dei corpi edilizi, informazioni che possono avere un ruolo non trascurabile sulla procedura utilizzata per il calcolo della prestazione energetica e che ricoprono un ruolo chiave nello studio delle strategie di retrofit energetico.

Tali informazioni sono reperibili nella Mappa Urbana del Nuovo Catasto Edilizio Urbano (NCEU) che la RAS mette a disposizione per gli usi consentiti alle amministrazioni comunali che ne fanno richiesta.

La Mappa Urbana è costituita dall'unione delle footprint degli edifici ricavate da un rilievo topografico di dettaglio sub metrico utilizzato per definire le proprietà dei terreni e degli immobili a fini fiscali. Per quanto tale dato sia teoricamente molto accurato, spesso le geometrie sono affette da mancanze ed imprecisioni,

¹<http://www.sardegnageoportale.it/areetematiche/modellidigitalidielevezione/>

tuttavia un operatore CAD o GIS, di medio bassa esperienza, confrontando la Mappa Urbana del NCEU con altre fonti di dati spaziali comunemente disponibili, può facilmente riconoscere l'articolazione degli edifici come unione o separazione dei Volumi Edilizi (VE) altrimenti non ricavabile dalla sola base topografica. Si può così ricavare e raffinare la rappresentazione delle Unità Edilizie (UE), comprendente anche gli aspetti relativi alla proprietà, ossia ai corpi di fabbrica soggetti a una gestione unitaria. Attraverso i riferimenti catastali si possono collegare agli elementi spaziali le informazioni sintetiche contenute nelle visure catastali ossia: le categorie catastali d'uso, n° di unità immobiliari, superfici catastali e/o numero di vani. Le categorie catastali sono piuttosto articolate e basate sulla redditività dell'uso dell'immobile (per dettagli si rimanda all'elenco completo [222]), tuttavia si può definire una matrice di corrispondenza (tabella 4.1) con i tipi di edificio proposti dalla normativa di riferimento per i calcoli energetici (DPR 412/93 e s. m. i), che settano i requisiti di comfort interno. La corrispondenza tra le due classificazioni non è perfetta in quanto le categorie catastali prevedono casi molto più vari e non pertinenti, vi sono perciò diverse incongruenze. Tuttavia in ambito urbano, dove la maggioranza degli edifici sono adibiti ad abitazione o ad altri usi affini per le finalità di un calcolo energetico, si può prevedere una corrispondenza.

La struttura dei dati catastali è la stessa in tutto il territorio nazionale, perciò di possono definire in maniera automatizzata procedure per ricavare i dati di interesse di per lo sviluppo della metodologia, impostando anche algoritmi per la tutela delle informazioni sensibili.

Tabella 4.1. Corrispondenza tra classi catastali.

Categorie edifici, art.3 DPR 412/93		Classi Catastali	Set point Temp.		Ventilazione di riferimento ¹ [m³/hour x m²]	Guadagni interni ² W/m²
Cod_412	descrizione		T.heat	T.cool		
E1.1	Abitazioni	Tutti i tipi di abitazioni (A1, ..., A11) eccetto A/10	20	26	0,3	X ³
E1.2	Abitazioni uso saltuario		20	26	0,3	X ³
E1.3	Alberghi e simili	B/1, B/3, D/2	20	26	0,4	6
E.2	Uffici e simili	A/10, B/4, E/3,	20	26	0,4	6
E.3	Cliniche ed Ospedali	B/2, D/4,	22	26	0,4	8
E.4.1	Teatri cinema, simili	D/3	19	26	0,4	8
E.4.2a	Musei, sale espositive	B/6, B/7, E/7, E/1	19	26	0,4	8
E.4.2b	Luoghi di culto		19	26	0,7	8
E.4.3	Bar, ristoranti, discoteche	C/1	20	26	1,0	10
E.5	Attività commerciali	C/1, D/8, D/5,	20	26	0,4	8
E6.1	Piscine e simili	C/5	28	26	0,7	10
E6.2	Palestre e simili	C/4	18	26	0,6	5
E6.3	Edifici a supporto dello sport	D/6	18	26	0,6	4
E7	Scuole e simili	B/5	20	26	0,5	4
E8	Laboratori,	C/3, D/1, D/7, D/10	18	26	0,5	6
NR1	Depositi non climatizzati	B/8, C/2,	-	-	-	-
NR2	Altri locali non climatizzati	B/8, C/6, C/7, E/2, E/4, E/5, E/6, E/8, E/10, D/9	-	-	-	-

¹dati riassunti dalla UNI 10339: 2008 e dalla UNI 11300:2008 -1 par 12

² valori unitari di guadagno di calore per attività interne (tabella 8 della UNI 11300:2008 -1),

³ I valori per le residenze sono ricavati da una formula basata sulla superficie utile (punto 13.1.1 della UNI 11300:2008-1)

4.3.2 Dati patrimonio edilizio

La tipizzazione del patrimonio edilizio richiede la costruzione di una solida conoscenza dei caratteri costruttivi e architettonici del contesto, basata sulla osservazione dei luoghi, sullo studio dei dati documentali e sull'analisi dei dati statistici e geografici disponibili. Gli elementi che caratterizzano la parte fisica del

patrimonio edilizio possono essere convenzionalmente suddivisi nelle dimensioni spaziali e geometriche, nella componente materico-strutturale e negli elementi impiantistici.

Per le sue particolarità di città di fondazione, Carbonia è un contesto molto studiato, soprattutto per quanto riguarda la parte legata all'architettura razionalista, inoltre le fonti di dati statistici nazionali e regionali sono in grado di tracciare in maniera abbastanza chiara le dinamiche che riguardano il processo di efficientamento del patrimonio edilizio, perciò si può concludere che la base conoscitiva documentale può essere considerata sufficiente alla impostazione generale dei contenuti e allo studio propedeutico alla tipizzazione del patrimonio. Tuttavia lo sviluppo di un UBEI richiede generalmente di legare le informazioni tipologico-costruttive a elementi spaziali specifici, generalmente coincidenti con il singolo edificio, dettaglio spaziale che i dati disponibili generalmente non supportano. La maggior parte delle fonti di dati statistici aperti sul patrimonio edilizio è riferita alla scala comunale (CPA ISTAT 2001, 2011) e le statistiche sugli interventi di efficientamento (ENEA GSE) e i consumi (energie elettrica e prodotti petroliferi) sono diffusi con dettaglio massimo tra il Regionale e il Provinciale. Le fonti di informazione aperta, aventi il dettaglio spaziale sub comunale utile allo sviluppo della metodologia (tabella 4.2), sono principalmente i dati contenuti nelle sezioni censuarie (Censimento Popolazione ed Abitazioni ISTAT 2011) e la base conoscitiva degli strumenti urbanistici locali (PUC e PPCS). Un aspetto prettamente tecnico, che limita l'utilizzo del patrimonio informativo contenuto negli strumenti di piano, è che l'amministrazione comunale ha diffuso le informazioni cartografiche in formati non facilmente utilizzabili per analisi spaziali e rielaborazioni (PDF), che perciò non sono da considerarsi una dato aperto a tutti gli effetti.

Lo studio preliminare dei dati disponibili ha potuto evidenziare i punti di forza e debolezza dei dati nella tipizzazione delle caratteristiche materico-strutturali e tecnologiche impiantistiche del patrimonio edilizio, mostrando come per lo sviluppo della metodologia sia necessario impostare una attività di rilievo coerente con le risorse disponibili.

La componente materico-strutturale, ossia l'involucro edilizio, è quella meglio descrivibile con i dati disponibili: nel centro della Fondazione la conoscenza di base del PPCS fornisce un prospetto articolato dei tipi edilizi razionalisti presenti e una individuazione spaziale al dettaglio del singolo edificio. Inoltre i manuali del recupero danno un quadro molto chiaro delle tecnologie costruttive storiche presenti e delle possibili azioni di riqualificazione degli edifici. Tuttavia tale dettaglio sulle tecniche costruttive riguarda solo gli edifici della fondazione e non quelli più recenti, seppure presenti anche all'interno del perimetro del PPCS. Per descrivere le aree esterne al centro di fondazione, ossia le espansioni successive al 1950, si può fare ricorso alle statistiche sugli edifici e sulle abitazioni contenute nelle sezioni censuarie (CPA ISTAT 2011) e sulla classificazione dei tessuti urbani contenuta nella base conoscitiva del PUC, che ha il dettaglio dell'isolato compatibile con le sezioni censuarie ISTAT. I tessuti urbani delle espansioni pianificate (zone C del PUC) mostrano tipologie di edifici molto riconoscibili e le caratteristiche costruttive possono essere desunte dalla documentazione progettuale dei piani di lottizzazione, presumibilmente disponibili presso l'amministrazione comunale. Le aree di completamento non regolate da piani specifici (Zone B del PUC) mostrano edifici di diversa natura, dai quali non è facile ricavare le caratteristiche strutturali con una semplice osservazione esterna. I dati sulle epoche di costruzione e le caratteristiche delle abitazioni (note per le sezioni censuarie) sono di indirizzo per impostare uno studio dei tipi edilizi a scala di isolato, tuttavia si sono già evidenziate incoerenze tra lo stato dei luoghi e i dati riportati, legati alla non perfetta coincidenza del concetto di edificio residenziale tra quella utilizzata per il rilievo ISTAT (2011) e quella necessaria per la modellazione energetica. Si renderà perciò necessario effettuare una campagna di indagine volta a chiarire la natura degli involucri di alcune tipologie di edifici molto diffuse (prevalentemente edifici isolati multi-familiari e due livelli fuori terra) nelle zone di edilizia non pianificata, che mostrano una attività edificatoria che interessa pressoché tutti gli intervalli temporali riportati dal censimento ISTAT. L'obiettivo è esplicitare le caratteristiche ricorrenti della componente materico-strutturale degli involucri edilizi per le tipologie di edifici rilevate nel contesto riferendole all'anno di costruzione.

Per quanto riguarda la componente impiantistica non si sono potuti ottenere dati di scala inferiore a quella comunale diffusa nel CPA 2011 (ISTAT). Si noti che i dati sugli impianti rilevati durante il Censimento sono stati diffusi al più a livello comunale, perciò non sono compresi nelle sezioni censuarie. I dati sugli interventi

di efficientamento energetico si fermano al massimo dettaglio provinciale, assolutamente non utilizzabile per il tipo di studio che si sta impostando, se non come riferimento generale.

Si è provveduto perciò a fare richiesta di accesso alle informazioni di alcuni data base pubblici non aperti gestiti su base regionale e nazionale (tabella 4.3), al duplice scopo di perfezionare la conoscenza e definire il dettaglio massimo eventualmente raggiungibile nel rispetto delle normative della privacy e dei regolamenti degli enti responsabili del dato. Per lo sviluppo della metodologia è comunque opportuno impostare e sperimentare una metodologia di rilievo e profilazione delle caratteristiche ricorrenti della componente tecnologico impiantistica del patrimonio edilizio.

Tabella 4.2. Schema dei dati disponibili per descrivere l'involucro edilizio.

Caratteristiche del Patrimonio	Centro Fondazione	Espansioni
Tessuto urbano	Conoscenza PPCS	Zonizzazione PUC Sez. Censuarie CPA 2011 Piani di lottizzazione (dato non aperto)
Tipi edilizi	Conoscenza PPCS (solo edifici storici)	Sez. Censuarie CPA 2011 Piani di lottizzazione (dato non aperto)
Strutture costruttive	Conoscenza PPCS (solo edifici storici)	Sez. Censuarie CPA 2011 Piani di lottizzazione (dato non aperto)

4.3.3 Dati uso del patrimonio

Le modalità d'uso del patrimonio edilizio, ossia la componente riferita al fattore umano che influenza la performance energetica del sistema edificio – impianto, è la meno rappresentata nei dati disponibili. Tale componente, al contrario, prende parte a vario titolo alle procedure di calcolo di prestazione energetica ed è fondamentale nello sviluppo di approcci volti alla stima dei consumi. I seguenti aspetti dovranno essere approfonditi e definiti con una appropriata attività di rilievo, al fine di ricavare i profili d'uso locali ricorrenti:

- profilo di presenza e d'uso degli ambienti;
- profilo di utilizzo e regolazione degli impianti;
- profilo microclimatico interno;
- profilo dei consumi per vettore energetico e per servizio.

Il profilo demografico può essere una base iniziale per definire il profilo d'uso, tuttavia esso è disponibile dettagliato alla sezione censuaria solo per il 2011 (CPA ISTAT 2011), mentre il dato dinamico con aggiornamento semestrale è diffuso solo su base comunale. Per quanto riguarda i consumi, i dati diffusi in formato aperto sono solo a scala regionale. Tuttavia il dettaglio rimane non sufficiente alla tipizzazione del patrimonio ma probabilmente più adatto alla fase di validazione del modello.

Tabella 4.3. Schema dei dati richiesti per completare il quadro della conoscenza.

DATO	DESCRIZIONE	FINALITÀ
Micro dati CPA 2011 (ISTAT) [223]	L'ISTAT permette di richiedere elaborazioni personalizzate sui dati delle sezioni censuarie (CPA 2011) non presenti nei dati diffusi in maniera aperta	Statistiche su impianti e tipo d'uso dell'edificio riferito alla sezione Censuaria (anno 2011)
Catasto Energetico (RAS)[224]	La Regione Sardegna raccoglie le APE nel Catasto Energetico e sta sviluppando un sistema per l'interrogazione dei dati (SIRA)	Statistiche su impianti e prestazioni energetiche a livello comunale, e se possibile, anche riferite all'edificio
Catasto Impianti (RAS – Provincia) [225]	La Regione Sardegna raccoglie su base provinciale i dati sugli impianti termici e sta sviluppando un sistema per l'interrogazione dei dati (SIRA)	Statistiche su impianti a livello comunale, e se possibile, anche riferite all'edificio
Interventi di efficientamento energetico (ENEA)	Si richiede di accedere ai dati di base utilizzati dall'ENEA per la redazione dei rapporti periodici	Statistiche interventi di efficientamento energetico a livello comunale, e se possibile, anche riferite all'edificio
Installazione di impianti FER (GSE)	Si richiede di accedere ai dati di base utilizzati dall'GSE per la redazione dei rapporti periodici e per ATLAImpianti	Statistiche su impianti FER a livello comunale, e se possibile, anche riferite all'edificio
Consumi Elettrici TERNA – RAS [226]	L'Amministrazione Comunale può richiedere tali dati per motivazione di pianificazione energetica, La RAS sta sviluppando la piattaforma SIRA [227]	Statistiche per la validazione del modello
Consumi di prodotti petroliferi RAS	L'amm. Comunale può richiedere tali dati per motivazione di pianificazione energetica, La RAS sta sviluppando la piattaforma SIRA [228]	Statistiche per la validazione del modello
Nuovo Catasto Edilizio Urbano (RAS Comune) [229]	I comuni tramite un servizio messo a disposizione della RAS possono accedere al DB catastale per le finalità proprie	Numero e destinazione d'uso delle unità immobiliari interne agli edifici. Individuazione degli edifici
Doc. Cartografica PUC e PPCS in formato vettoriale	Il formato diffuso (PDF) dalla amministrazione comunale non è adatto alle analisi spaziali utili alla tipizzazione del patrimonio	Dato cartografico utile per analisi spaziali
Piani di lottizzazione (Comune)	Contengono informazioni tipologiche e tecnico costruttive delle aree di espansione pianificate	Utile al riconoscimento delle tipologie ricorrenti di strutture edilizie

5 Riferimenti bibliografici

- ¹ <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/clean-energy-all-europeans>
- ² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018L0844&from=EN>
- ³ U. Eicker et al.; "Polycity – Energy Networks in Sustainable Cities – Best Practice from three European Communities", Karl Kraemer Verlag Stuttgart Zurich (2012), ISBN 978-3-7828-4051-4; <http://www.polycity.net/pdf/POLYCITY-Book.pdf>
- ⁴ S. Joss, D. Tomozeiu, R. Cowley, "Eco-Cities – A Global Survey", Published by University of Westminster International Eco-Cities Initiative; Copyright c 2011 University of Westminster; ISBN: 978-0-9570527-0-3
- ⁵ <https://www.odyssee-mure.eu/publications/br/energy-efficiency-trends-policies-buildings.pdf>
- ⁶ P. De Pascali, "Città ed Energia: La valenza energetica dell'organizzazione dell'insediamento", Franco Angeli (2008), Milano, ISBN-13: 9788846499288
- ⁷ P. De Pascali, M. Reginaldi, V. Alberti, D. De Ioris. Applicazioni di sostenibilità eco-energetica per la riqualificazione urbana. Editore: Orienta Edizioni (2014), ISBN-13: 9788896467312
- ⁸ Jones P., Lannon S., Patterson J. (2013) Retrofitting existing housing: how far, how much?, Building Research & Information, 41:5, 532-550, <https://doi.org/10.1080/09613218.2013.807064>
- ⁹ Ravetz J.; State of the stock —What do we know about existing buildings and their future prospects? Energy Policy 36 (2008) 4462–4470; <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.026>
- ¹⁰ Droege P. (2007); The renewable city: A comprehensive guide to an urban revolution. London, Wiley, 2007
- ¹¹ Power, A., 2008. Does demolition or refurbishment of old and inefficient homes help to increase our environmental, social and economic viability?; Energy Policy 36 (12), 4487–4501
- ¹² Manfren M., Caputo P., Costa G., (2011). Paradigm shift in urban energy systems through distributed generation: Methods and models. Applied Energy, 88, 1032–1048
- ¹³ Jank R.; Advanced Local Energy Planning (ALEP) - A Guidebook; ECBCS Annex Publications - Annex 33 Advanced Local Energy Planning (ALEP); Germany, Karlsruhe, Klimaschutz- und Energieagentur, Baden-Württemberg GmbH, October 2000
- ¹⁴ Hiremath R.B., Shikha S., Ravindranath N.H., (2007); Decentralized energy planning; modeling and application—a review; Renewable and Sustainable Energy Reviews 11 (2007) 729–752; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.07.00>
- ¹⁵ P. Gupta, S. S. Anand, H. Gupta, "Developing a roadmap to overcome barriers to energy efficiency in buildings using best worst method", Sustainable Cities and Society 31 (2017) 244–259, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.005>
- ¹⁶ D.E. Yeatts, D. Auden, C. Cooksey C., C. F. Chen, "A systematic review of strategies for overcoming the barriers to energy-efficient technologies in buildings", Energy Research & Social Science Volume 32, October 2017, Pages 76-85, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.03.010>
- ¹⁷ L. Kranzl and the ENTRANZE consortium, "Laying Down The Pathways To Nearly Zero-Energy Buildings A toolkit for policy makers", Final Report of the Policies to enforce the transition to nearly zero energy buildings in the EU-27 (ENTRANZE) founded by IEE (2014), <http://www.entranze.eu/pub/pub-policies>
- ¹⁸ P. Caputo, G. Pasetti. Overcoming the inertia of building energy retrofit at municipal level: The Italian Challenge. Sustainable Cities and Society, 15 (2015), pp. 120-134
- ¹⁹ Del Mastro, C., Mutani, G., Corgnati, S. P. (2016). A supporting method for selecting cost-optimal energy retrofit policies for residential buildings at the urban scale. Energy Policy, 99, 42–56.

-
- ²⁰ Caputo, P., Costa, G., & Ferrari, S. (2013). A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale. *Energy Policy*, 55, 261–270
- ²¹ Top 10 smart cities, <https://www.smartcity.press/>
- ²² Nam T., Pardo T.A., 2011. Conceptualizing smart city with dimensions of technology, people, and institutions, in: *Proceedings of the 12th Annual International Digital Government Research Conference: Digital Government Innovation in Challenging Times*. ACM, pp.82–291
- ²³ Berra M., Nuciari M., SMART Cities: Infrastrutture ICT per la partecipazione sociale?, in *Quaderni di Sociologia* n°63/2013, pp. 127-153, <https://journals.openedition.org/qds/427#tocto2n1>
- ²⁴ F. Mosannenzadeh, D. Vettorato (2014). Defining smart city: a conceptual framework based on keyword analysis, *Tema, Journal of Land Use, Mobility, and Environment*, special issue, June 2014
- ²⁵ Henry Etzkowitz & Loet Leydesdorff. The dynamics of innovation: from National Systems and “Mode 2” to a Triple Helix of university–industry–government relations. pp. 111. 2000
- ²⁶ Winters, J.V., 2011. Why are smart cities growing? Who moves and who stays. *Journal of Regional Science* 51, 253–270. <https://doi:10.1111/j.1467-9787.2010.00693>
- ²⁷ Canton, J., 2011. The extreme future of megacities. *Significance* 8, 53–56
- ²⁸ Moss Kanter R., Stanley S. Litow (2009). Informed and Interconnected: A Manifesto for Smarter Cities. Harvard Business School Working Paper. <http://www.hbs.edu/faculty/Publication%20Files/09-141.pdf>
- ²⁹ Giffinger R., Fertner C., Kramar H., Kalasek R., Pichler-Milanovic N., Meijers E. (2007), *Smart cities – Ranking of European medium-sized cities*, Centre of Regional Science, Vienna UT.
- ³⁰ Caragliu A., Del Bo C., Nijkamp P. (2009), *Smart Cities in Europe*, «The Journal of Urban Technology», 18, 2, April 2011, pp. 65-82
- ³¹ <https://www.oice.it/516146/smart-city-uno-strumento-per-le-comunit-intelligenti>
- ³² [https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Smart_City_Index_2018/\\$FILE/EY_SmartCityIndex_2018.pdf](https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Smart_City_Index_2018/$FILE/EY_SmartCityIndex_2018.pdf)
- ³³ Rama Krishna Reddy Kummitha, Smart Cities and entrepreneurship: An agenda for future research, *Technological Forecasting & Social Change* 149 (2019) 119763, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119763>
- ³⁴ Strategic Opportunity Analysis of the Global Smart City Market” - Frost and Sullivan (2013) <https://www.slideshare.net/FrostandSullivan/smart-city-perevezentsevang>
- ³⁵ Herrschel, T., 2013. Competitiveness AND Sustainability: Can “Smart City Regionalism” Square the Circle? *Urban Studies* 50, 2332–2348. <https://doi:10.1177/0042098013478240>
- ³⁶ Borsboom-van Beurden, J. Kallaos, B. Gindroz, S. Costa, J. Riegler, Smart City guidance Package. A road map for Integrated Planning and Implementaion of Smart City Projects, EIP- SSC 2019, <https://eu-smartcities.eu/news/smart-city-guidance-package>
- ³⁷ Smart City: la via italiana Tavolo permanente, www.StartMag.it
- ³⁸ <https://eu-smartcities.eu/page/european-context> (2019)
- ³⁹ ABB The European House-Ambrosetti, (2012), Smart Cities in Italia: un’opportunità nello spirito del Rinascimento per una nuova qualità della vita. 38° edizione del Forum di Villa d’Este, 8 settembre 2012,

-
- ⁴⁰ Nielsen, P. S., Ben Amer, S., & Halsnæs, K. (2013). Definition of smart energy city and state of the art of 6 transform cities using key performance indicators: Deliverable 1.2
- ⁴¹ Hollands, R. G. (2008). Will the real smart city please stand up?: Intelligent, progressive or entrepreneurial? *City*, 12, 303–320. <http://dx.doi.org/10.1080/13604810802479126>, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2017.02.001>
- ⁴² Farnaz Mosannenzadeh, Adriano Bisello, Roberto Vaccaro, Valentina D'Alonzo, Garfield Wayne Hunter, Daniele Vettorato. Smart energy city development: A story told by urban planners, *Cities* 64 (2017) 54–65, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2017.02.001>
- ⁴³ <http://www.energystategy.it/report/smart-grid.html>
- ⁴⁴ Livio De Santoli (coordinatore) ed altri (2016). SMART Grid. Strategia per le comunità dell'energia su scala urbana. Editoria il delfino Milano 2016. ISBN: 9788897323495
- ⁴⁵ Dileep G (2020). A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable Energy* 146 (2020) 2589e2625. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.092>
- ⁴⁶ Vine, D., Buys, L. and Morris, P. (2013) The Effectiveness of Energy Feedback for Conservation and Peak Demand: A Literature Review. *Open Journal of Energy Efficiency*, 2, 7-15. <https://doi:10.4236/ojee.2013.21002>
- ⁴⁷ Karjalainen S., (2011). Consumer preferences for feedback on household electricity consumption. *Energy and Buildings*, 43, 458-467.
- ⁴⁸ G. Jacucci, A. Spagnolli, L. Gamberini, A. Chalambalakis, C. Bjorksog, M. Bertoncini, C. Torstensson and P. Monti, "Designing Effective Feedback of Electricity Consumption for Mobile User Interfaces," *PsychNology Journal*, Vol. 7, No. 3, 2009, pp. 265-289
- ⁴⁹ Gulbinas, Rimantas & Jain, Rishree & Taylor, John & Peschiera, Gabriel & Golparvar-Fard, Mani. (2013). Network Ecoinformatics: Development of a Social Ecofeedback System to Drive Energy Efficiency in Residential Buildings. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 28. 89-98. 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000319.
- ⁵⁰ http://www.greencityenergy.it/attibari2012/MARTEDI13NOVEMBRE/SMARTGRID&ICT/I%20SESSIONE/Mauro_Annunziato.pdf
- ⁵¹ <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/clean-energy-all-europeans>
- ⁵² <https://www.mise.gov.it/index.php/it/energia/energia-e-clima-2030>
- ⁵³ https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/trends_to_2030_update_2007.pdf
- ⁵⁴ https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en
- ⁵⁵ <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/technology-and-innovation/strategic-energy-technology-plan>
- ⁵⁶ <https://setis.ec.europa.eu/>
- ⁵⁷ <https://www.eera-set.eu/eera-joint-programmes-jps/list-of-jps/>
- ⁵⁸ <https://eu-smartcities.eu/>
- ⁵⁹ <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/h2020-energy/projects-by-field/879>
- ⁶⁰ <http://mission-innovation.net/our-members/italy/>

-
- ⁶¹ <http://www.eumayors.eu/>
- ⁶² https://www.covenantofmayors.eu/IMG/pdf/seap_guidelines_it-2.pdf
- ⁶³ <http://www.concerto-project.org/results>
- ⁶⁴ <https://civitas.eu/>
- ⁶⁵ <https://www.triangulum-project.eu/>
- ⁶⁶ <https://www.smarter-together.eu/>
- ⁶⁷ <http://www.remourban.eu/>
- ⁶⁸ <http://www.grow-smarter.eu/home/>
- ⁶⁹ <https://www.smarter-together.eu/eu-smart-cities-and-communities> ;
<https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/h2020-energy/projects-by-field/879?page=1>
- ⁷⁰ <http://www.sinfonia-smartcities.eu/>
- ⁷¹ Yvann Nzengue, Adrien du Boishamon, Karine Laffont-Eloire, Vincent Partenay, Yassine Abdelouadoud, Pietro Zambelli, Valentina D'Alonzo, Roberto Vaccaro, Planning city refurbishment: An exploratory study at district scale how to move towards positive energy districts – approach of the SINFONIA project Conference: 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), [https://DOI: 10.1109/ICE.2017.8280045](https://doi.org/10.1109/ICE.2017.8280045)
- ⁷² <http://alpsth.bplaced.net/wordpress/>
- ⁷³ Z. Ma, P. Cooper, D. Daly, L. Ledo, “Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art”, Energy and Buildings 55 (2012) 889–902, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.018>
- ⁷⁴ <https://energyplus.net/>
- ⁷⁵ <http://www.trnsys.com/>
- ⁷⁶ <https://new.usgbc.org/leed>
- ⁷⁷ http://www.itaca.org/valutazione_sostenibilita.asp
- ⁷⁸ <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/>
- ⁷⁹ A. Mickaitytė, E. Zavadskas, A. Kaklauskas, L. Tupėnaitė, “The concept model of sustainable buildings refurbishment”, International Journal of Strategic Property Management (2008) 12, 53–68
- ⁸⁰ F. Roberti, U. Filippi, Oberegger, E. Lucchi, A. Troi, “Energy retrofit and conservation of a historic building using multi-objective optimization and an analytic hierarchy process”, Energy and Buildings 138 (2017) 1–10, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.028>
- ⁸¹ Ciribini, A. L. (2016). BIM e digitalizzazione dell’ambiente costruito. Grafill, Palermo.
- ⁸² E. Genova, G. Fatta, C. Vinci, “The recurrent characteristics of historic buildings as a support to improve their energy performances: the case study of Palermo”, 8th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-16, 11-13 September 2016, Turin, ITAL, Energy Procedia 111 (2017) 452 – 461
- ⁸³ G. Semprini, C. Marinosci, A. Ferrante, G. Predari, G. Mochi, M. Garai, R. Gulli, “Energy management in public institutional and educational buildings: The case

of the school of engineering and architecture in Bologna”, *Energy and Buildings* 126 (2016) 365–374, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.009>

⁸⁴ T. Ahmad, M. J. Thaheem, “Economic sustainability assessment of residential buildings: A dedicated assessment framework and implications for BIM”, *Sustainable Cities and Society* 38 (2018) 476–491, <https://doi:10.1016/j.scs.2018.01.035>

⁸⁵ K. Kass, A. Blumberga, D. Blumberga, G. Zogla, A. Kamenders, E. Kamendere, “Pre-assessment method for historic building stock renovation evaluation”, *International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2016, 12-14 October 2016, Riga, Latvia, Energy Procedia* 113 (2017) 346 – 353, <https://doi:10.1016/j.egypro.2017.04.004>

⁸⁶ C. Sousa Monteiro, A. Pina, C. Cerezo, C. F. Reinhart, P. Ferrão, “The use of multi-detail building archetypes in urban energy modelling”, *8th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-16, 11-13 September 2016, Turin, ITALY, Energy Procedia* 111 (2017) 817 – 825, <https://doi:10.1016/j.egypro.2017.03.244>

⁸⁷ A. Kylili, P. A. Fokaides, “European smart cities: The role of zero energy buildings “, *Sustainable Cities and Society* Volume 15, July 2015, Pages 86-95, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2014.12.003>

⁸⁸ N. H. Ramli, et alt., “A Comparative Study of Green School Guidelines”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 50 (2012) 462 – 471, <https://doi:10.1016/j.sbspro.2012.08.050>

⁸⁹ M. Rota, S. P. Corgnati, L. Di Corato, “The museum in historical buildings: Energy and systems. The project of the Fondazione MuseiSenesi”, *Energy and Buildings* 95 (2015) 138–143, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.008>

⁹⁰ Scherer, R. J., Katranuschkov, P. BIMification: How to create and use BIM for retrofitting. *Advanced Engineering Informatics*, 2018, 38: 54-66

⁹¹ McArthur, J. J. A building information management (BIM) framework and supporting case study for existing building operations, maintenance and sustainability. *Procedia Engineering*, 2015, 118: 1104-1111.

⁹² Entzian K., Scharmann R., BIM for existing buildings, in: A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz (Eds.), *Building Information Modeling*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, pp. 371–383.

⁹³ EN 16247-1:2012. Energy audits – Part 1: General requirements

⁹⁴ L. A. Webb, “Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77 (2017) 748–759

⁹⁵ E. Vieites, I. Vassileva, E. J. Arias, “European initiatives towards improving the energy efficiency in existing and historic buildings”, *The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015, Energy Procedia* 75 (2015) 1679 – 1685, <https://doi:10.1016/j.egypro.2015.07.418>

⁹⁶ ASHRAE Guideline 34P, *Energy Guideline for Historical Buildings Second Public Review Draf*, https://www.techstreet.com/ashrae/ashrae_standards.html

⁹⁷ MiBACT - Segreteria tecnica, “Linee di indirizzo per il miglioramento dell’efficienza energetica nel patrimonio culturale, Architettura, centri e nuclei storici ed urbani”, <http://www.beniculturali.it/mibac/export/MiBAC/>

⁹⁸ G. Carbonara, “Energy efficiency as a protection tool” *Energy and Buildings* 95 (2015) 9–12, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.052>

⁹⁹ L. Mazzarella, “Energy retrofit of historic and existing buildings. The legislative and regulatory point of view”, *Energy and Buildings* 95 (2015) 23–31, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.073>

¹⁰⁰ A. Power, “Does demolition or refurbishment of old and inefficient homes help to increase our environmental, social and economic viability?”; *Energy Policy* 36 (2012), 4487–4501

- ¹⁰¹ F. Ascione, N. Bianco, R.F. De Masi, F. De Rossi, G. P. Vanoli, "Energy retrofit of an educational building in the ancient centre of Benevento. Feasibility study of energy savings and respect of the historical value", *Energy and Buildings* Volume 95, 15 May 2015, Pages 172-183, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.072>
- ¹⁰² A. Thomas Phoenix (2015), Lessons learned: ASHRAE's approach in the refurbishment of historic and existing buildings, *Energy and Buildings* 95 (2015) 13–14, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.034>
- ¹⁰³ A. Galatioto, G. Ciulla, R. Ricciu, "An overview of energy retrofit actions feasibility on Italian historical buildings", *Energy* 137 (2017) 991e1000
- ¹⁰⁴ L. De Santoli, "Guidelines on energy efficiency of cultural heritage", *Energy and Buildings* 86 (2015) 534–540, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.050>
- ¹⁰⁵ M. Filippi, "Remarks on the green retrofitting of historic buildings in Italy", *Energy and Buildings* 95 (2015) 15–22
- ¹⁰⁶ Ballarini, Ilaria, Stefano Paolo Corgnati, and Vincenzo Corrado. "Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project." *Energy Policy* 68 (2014): 273-284.
- ¹⁰⁷ Margiotta F. "Metodologia per la determinazione delle caratteristiche strutturali ed impiantistiche di "Edifici Tipo" del Parco Edilizio Nazionale ad uso ufficio e Valutazione del Potenziale di Risparmio energetico sulla base della fattibilità degli interventi di riqualificazione Energetica " ENEA RdS/2010/197.
- ¹⁰⁸ Reinhart, C. F., & Cerezo Davila, C. (2016). Urban building energy modeling — A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>
- ¹⁰⁹ Hiremath R.B., Shikha S., Ravindranath N.H., (2007); Decentralized energy planning; modeling and application—a review; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007) 729–752; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.07.00>
- ¹¹⁰ Shimoda Y., Asahi T., Taniguchi A., Mizuno M., (2007); Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model; *Energy* 32 (2007) 1617–1633; <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.007>
- ¹¹¹ Yamaguchi Y., Shimoda Y., Mizuno M, (2007a); Proposal of a modeling approach considering urban form for evaluation of city level energy management; *Energy and Buildings* 39 (2007) 580–592, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.09.011>
- ¹¹² Keirstead J., Jennings M., Sivakumar A. (2012); A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 3847– 3866; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.047>
- ¹¹³ Heeren N., Jakob M., Martius G., Gross N., Wallbaum H.; A component based bottom-up building stock model for comprehensive environmental impact assessment and target control; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (2013) 45–56; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (2013) 45–56
- ¹¹⁴ Ifigeneia Theodoridou, Agis M. Papadopoulos, Manfred Hegger, (2012); A feasibility evaluation tool for sustainable cities – A case study for Greece; *Energy Policy* 44 (2012) 207–216, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.042>
- ¹¹⁵ Angelis - Dimakis A., Biberacher M., Javier Dominguez J., Fiorese G., Gadocha S., Edgard Gnansounou E., Guariso G., Kartalidis A., Panichelli L., Pinedo I., Michela Robba M. (2011); Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1182–1200; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.049>
- ¹¹⁶ Biberacher, M., Gadocha S., Zocher D., (2008). GIS based Model to optimize possible selfsustaining regions in the context of renewable energy supply. Sánchezmarrè M., Béjar J., Comas J., Rizzoli A. & Guariso G. (a cura di). *Proc. of the iEMSS Fourth Biennial Meeting*, 1306-1313

- ¹¹⁷ Vettorato D., Geneletti D., Zambelli P. (2011); Spatial comparison of renewable energy supply and energy demand for low-carbon settlements; *Cities* 28 (2011) 557–566; <https://doi:10.1016/j.cities.2011.07.004>
- ¹¹⁸ Stefano Pili, Giuseppe Desogus, Davide Melis, A GIS tool for the calculation of solar irradiation on buildings at the urban scale, based on Italian standards. *Energy and Buildings* Volume 158, 1 January 2018, Pages 629–646. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.027>
- ¹¹⁹ Fracastoro G.V., Serraino M.A, A methodology for assessing the energy performance of large scale building stocks and possible applications, *Energy and Buildings* 43 (4) (2011) 844–852, <https://doi:10.1016/j.enbuild.2010.12.004>
- ¹²⁰ Dalla Costa S. (2010), Quadro Conoscitivo condiviso orientato alla modellazione delle prestazioni energetiche nell'edilizia residenziale, 6° Conferenza INPUT, Potenza
- ¹²¹ Gadsden S., Rylatt M., Lomas K., Robinson D. (2003b); Predicting the urban solar fraction: a methodology for energy advisers and planners based on GIS; *Energy and Buildings* 35 (2003) 37–48
- ¹²² Cabrera D., Seal T. & Bertholet J.L., Lachal B., Jeanneret C. (2012); Evaluation of energy efficiency program in Geneva Evaluation methodology and experience feedback for two subprograms using bottom-up approach; *Energy Efficiency* (2012) 5:87–96; <https://DOI:10.1007/s12053-011-9110-1>
- ¹²³ Diakoulaki D, Antunes C, Martins G. (2005); A. MCDA and energy planning. Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. 2005; 78:859-90.
- ¹²⁴ Lukas G. Swan, V. Ismet Urgursal, *Modeling of end use Energy consumption in the residential sector: A review of modelling techniques*, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1819-1835
- ¹²⁵ Kavgić M., Mavrogianni A., Mumovic D., A. Summerfield, Z. Stevanovic, M. Djurovic-Petrovic, (2010); A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector; *Building and Environment* 45 (2010) 1683–1697; <https://doi:10.1016/j.buildenv.2010.01.021>
- ¹²⁶ Niko Heeren, Martin Jakob, Gregor Martius, Nadja Gross, Holger Wallbaum, A component based bottom-up building stock model for comprehensive environmental impact assessment and target control, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 20, April 2013, Pages 45-56, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.064>
- ¹²⁷ Narjes Abbasabadi, Mehdi Ashayeri, Urban energy use modelling methods and tools: A review and an outlook, *Building and Environment* 161 (2019) 106270, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106270>
- ¹²⁸ Shem Heiple, David J. Sailor (2008); Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles; *Energy and Buildings* 40 (2008) 1426–1436; <https://doi:10.1016/j.enbuild.2008.01.005>
- ¹²⁹ Wenliang Li, Yuyu Zhou, Kristen Cetin, Jiyong Eom, Yu Wang, Gang Chen, Xuesong Zhang. (2017). Modeling urban building energy use: A review of modelling approaches and procedures. *Energy* 141 (2017) 2445e2457. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.071>
- ¹³⁰ McLoughlina F., Duffya A., Conlon M. (2011); Characterising domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socioeconomic variables: An Irish case study; *Energy and Buildings* 48 (2011) 240–248; <https://doi:10.1016/j.enbuild.2012.01.037>
- ¹³¹ Jank R., (2005); Advanced Local Energy Planning (ALEP) – a modern approach to sustainable community systems; proceeding The 2005 World Sustainable Building Conference, Tokyo, 2005
- ¹³² Bartusch C., Odlare M., Wallin F., Wester L. (2012); Exploring variance in residential electricity consumption: Household features and building properties; *Applied Energy* 92 (2012) 637–643; <https://doi:10.1016/j.apenergy.2011.04.034>

-
- ¹³³ Anzioso F., Carbonell J., Danov S., Destefanis A., Duminil E., Erhart T., Hettler F., Sivenova T., Strzalka A., Strzalka R. (2012) Communal Energy Management; in POLYCITY energy networks in sustainable cities; Kramer Verlag, Zurich ISBN 978-3-7828-4051-4
- ¹³⁴ Chandler H., 2008. Empowering variable renewables: options for flexible electricity systems. OECD/IEA
- ¹³⁵ McKenna E., Richardson I., Thomson M. (2012); Smart meter data: Balancing consumer privacy concerns with legitimate applications; Energy Policy 41 (2012) 807–814; <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.049>
- ¹³⁶ B. Howard, L. Parshall, J. Thompson, S. Hammer, J. Dickinson, V. Modi, Spatial distribution of urban building energy consumption by end use. Energy and Buildings Volume 45, February 2012, Pages 141-15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.061>
- ¹³⁷ Burgess, J., Nye, M., 2008. Re-materialising energy use through transparent monitoring systems. Energy Policy 36, 4454–4459
- ¹³⁸ Hargreaves, T., Nye, M., Burgess, J., 2010. Making energy visible: a qualitative field study of how householders interact with feedback from smart energy monitors. Energy Policy 38, 6111–6119.
- ¹³⁹ Karjalainen S., (2011). Consumer preferences for feedback on household electricity consumption. Energy and Buildings, 43, 458-467
- ¹⁴⁰ Geert P.J. Verbong, Beemsterboer S., Sengers F.; Smart grids or smart users? Involving users in developing a low carbon electricity economy; Energy Policy 52 (2013) 117–125; <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.003>
- ¹⁴¹ Ratti C., Baker N. Steemers K. (2005); Energy consumption and urban texture; Energy and Buildings 37 (2005) 762–776
- ¹⁴² Noorian M., Moradi I., Kamali G. A. (2008); Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces; Renewable Energy 33 (2008) 1406–1412; <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.06.027>
- ¹⁴³ Carneiro C., Morello E., Desthieux G., Golay F. (2010); Extracting urban environment quality indicators using georeferenced data and image processing techniques 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2010 Guimarães, Portugal
- ¹⁴⁴ Masson V. 2006. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. Theoretical and Applied Climatology, 84 (1-3), 35-45
- ¹⁴⁵ Robinson D., Campbell N., Gaiser W, Kabel K., Le-Mouel A., Morel N., Page J., Stankovic S., Stone A. (2007); SUNtool – A new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability; Solar Energy 81 (2007) 1196–1211
- ¹⁴⁶ Rylatt M., Gadsden S., Lomas K., (2001); Putting solar energy on the urban map: A GIS-based decision support for solar energy planning in urban environment; Computer Environment and Urban System 25 (2001) 579-603
- ¹⁴⁷ Wong N. H., Kardinal Jusuf S., Liang Tan C. (2011); Integrated urban microclimate assessment method as a sustainable urban development and urban design tool; Landscape and Urban Planning 100 (2011) 386–389; <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.012>
- ¹⁴⁸ Shimoda Y., Asahi T., Taniguchi A., Mizuno M., (2007); Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model; Energy 32 (2007) 1617–1633; <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.007>
- ¹⁴⁹ Morello E., Ratti C. (2009); Sunscapes: ‘Solar envelopes’ and the analysis of urban DEMs; Computers, Environment and Urban Systems 33 (2009) 26–34; <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.005>

-
- ¹⁵⁰ Girardin L., Marechal F., Dubuis M., Calame-Darbellay N., Favrat D.; EnerGis: A geographical information based system for the evaluation of integrated energy conversion systems in urban areas; *Energy* 35 (2010) 830–840; <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.08.018>
- ¹⁵¹ Hong T, Chen Y, Lee SH, Piette MA. CityBES: a web-based platform to support cityscale building energy efficiency. *Urban Comput* 2016, San Francisco, San Francisco, California USA; 2016
- ¹⁵² Reinhart CF, Dogan T, Jakubiec JA, Rakha T, Sang A. Umi – an urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability. In: *Proc BS201313th conference in build performance simulation assoc*; 2013. p. 476–83
- ¹⁵³ Romain Nouvel, Alessio Mastrucci, Ulrich Leopold, Olivier Baume, Volker Coors Ursula Eicker. (2015) Combining GIS-based statistical and engineering urban heat consumption models: Towards a new framework for multi-scale policy support. *Energy and Buildings* Volume 107, 15 November 2015, Pages 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.021>
- ¹⁵⁴ <https://meteonorm.com/en/>
- ¹⁵⁵ <https://inspire.ec.europa.eu/Themes/126/2892>
- ¹⁵⁶ Carneiro C., Morello E., Desthieux G., Golay F. (2010); Extracting urban environment quality indicators using georeferenced data and image processing techniques 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2010 Guimarães, Portugal
- ¹⁵⁷ Filip Biljecki, Hugo Ledoux, Jantien Stoter. (2016) An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 59, September 2016, pp.
- ¹⁵⁸ W. Xu, Q. Zhu, Z. Du, Y. Zhang, Design and implementation of 3D model database for general-purpose 3D GIS, *Geo – Spatial Inf.Sci.*, 13 (3) (2010), pp. 210-215
- ¹⁵⁹ J. Hofierka, M. Zlocha, A new 3D solar radiation model for 3-D city models, *Trans. GIS*, 16 (5) (2012), pp. 681-690
- ¹⁶⁰ Filip Biljecki (2017). Level of detail in 3d city models, tesi dottorato Delft University of Technology. <https://books.bk.tudelft.nl/index.php/press/catalog/view/isbn.9789461868008/520/139-1>
- ¹⁶¹ G. Gröger, L. Plümer, CityGML—interoperable semantic 3D city models, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* (2012) 12–33
- ¹⁶² Wouter R.W.A., Ferry L.; Van Kann M.G. (2013); Spatial planning based on urban energy harvesting toward productive urban regions; *Journal of Cleaner Production* 39 (2013) 180e190; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.014>
- ¹⁶³ Hiremath R. B., Balachandra P., Kumar B., Bansode S. S., Murali J.(2013) Indicator-based urban sustainability—A review, *Energy for Sustainable Development* 17 (2013) 555–563, <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2013.08.004>
- ¹⁶⁴ E. Mata, A. Sasic Kalagasidis, F. Johnsson, Building-stock aggregation through archetype buildings: France, Germany, Spain and the UK, *Building and Environment* 81 (2014) 270e282, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.013>
- ¹⁶⁵ D. Robinson, N. Campbell, W. Gaiser, K. Kabel, A. Le-Mouel, N. Morel, J. Page, S. Stankovic, A. Stone (2007); SUNtool – A new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability; *Solar Energy* 81 (2007) 1196–1211
- ¹⁶⁶ Carlos Cerezo, Julia Sokol, Saud AlKhaled, Christoph Reinhart, Comparison of four building archetype characterization methods in urban building energy modelling (UBEM): A residential case study in Kuwait City, *Energy and Buildings*, Volume 154, 1 November 2017, Pages 321-334, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.029>

- ¹⁶⁷ Paola Caputo, Gaia Costa, Simone Ferrari, A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale, *Energy Policy*, Volume 55, April 2013, Pages 261-270, <https://doi:10.1016/j.enpol.2012.12.006>
- ¹⁶⁸ Martin Heine, Kristensen Rasmus, Elbæk Hedegaard, Steffen Petersen, Hierarchical calibration of archetypes for urban building energy modelling, *Energy and Buildings*, Volume 175, 15 September 2018, Pages 219-234, <https://doi:10.1016/j.enbuild.2018.07.030>
- ¹⁶⁹ Aline Schaefer, Enedir Ghisi, Method for obtaining reference buildings, *Energy and Buildings*, Volume 128, 15 September 2016, Pages 660-672, <https://doi:10.1016/j.enbuild.2016.07.001>
- ¹⁷⁰ L. Filogamo, G. Peri, G. Rizzo, A. Giaccone, On the classification of large residential buildings stocks by sample typologies for energy planning purposes, *Appl. Energy* 135 (2014) 825–835, <https://doi:10.1016/j.apenergy.2014.04.002>
- ¹⁷¹ Claudia Sousa Monteiro, André Pina, Carlos Cerezo, Christoph Reinhart, Paulo Ferrão, The use of multi-detail building archetypes in urban energy modelling 8th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-16, 11-13 September 2016, Turin, ITALY, *Energy Procedia* 111 (2017) 817 – 825
- ¹⁷² D. Coakley, P. Raftery, M. Keane, A review of methods to match building energy simulation models to measured data, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 37 (2014) 123–141, <https://doi:10.1016/j.rser.2014.05.007>
- ¹⁷³ Mastrucci, A., Baume, O., Stazi, F., & Leopold, U. (2014). Estimating energy savings for the residential building stock of an entire city: A GIS-based statistical downscaling approach applied to Rotterdam. *Energy and Buildings*, 75, 358–367. <http://dx.doi:10.1016/j.enbuild.2014.02.032>
- ¹⁷⁴ Alaa Alhamwi, Wided Medjroubi, Thomas Vogt, Carsten Agert (2019), Development of a GIS-based platform for the allocation and optimisation of distributed storage in urban energy systems *Applied Energy* Volume 251, 1 October 2019, 113360. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113360>
- ¹⁷⁵ Amado, M.; Poggi, F. Solar Energy Integration in Urban Planning: GUUD Model. *Energy Procedia* 2014, 50, 277–284
- ¹⁷⁶ Sara Torabi Moghadam, Jacopo Toniolo, Guglielmina Mutani, Patrizia Lombardi, A GIS-statistical approach for assessing built environment energy use at urban scale, *Sustainable Cities and Society* 37 (2018) 70–84, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.002>
- ¹⁷⁷ D. Robinson (2009), F. Haldi, J. Kämpf, P. Leroux, D. Perez, A. Rasheed and U. Wilke (2009); From the neighbourhood to the city : resource flow modelling for urban sustainability. CISBAT 2009, Lausanne, September 2-3
- ¹⁷⁸ Page, J., Robinson, D., Morel, N., Scartezzini, J.-L. (2007), A generalised stochastic model for the prediction of occupant presence, *Energy and Buildings*, 40(2) p83-98.
- ¹⁷⁹ Guideline 14-2014 ASHRAE. Measurement of energy and demand savings. Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers; 2014
- ¹⁸⁰ Balcomb JD, Burch JD, Subbarao K. Short-term energy monitoring of residences. Conference Short-term energy monitoring of residences, vol. 99. p.935 e 944
- ¹⁸¹ Monetti V, Davin E, Fabrizio E, Andre P, Filippi M. Calibration of building energy simulation models based on optimization: a case study. *Energy Procedia* 2015; 78:2971 - 6
- ¹⁸² Sokol Julia, Cerezo Davila Carlos, Reinhart Christoph F Validation of a Bayesian-based method for defining residential archetypes in urban building energy models. *Energy and Buildings*, Volume 134, 1 January 2017, Pages 11-24, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.050>
- ¹⁸³ Carlos Cerezo, Julia Sokol, Saud AlKhaled, Christoph Reinhart , Adil Al-Mumin, Ali Hajiahd, Comparison of four building archetype characterization methods in urban building energy modeling (UBEM): A residential

case study in Kuwait City. *Energy and Buildings* Volume 154, 1 November 2017, Pages 321-334. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.029>

¹⁸⁴ Ali U. et alii (2018). Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms for Building Archetypes Development in Urban Energy Modeling. Available from: https://www.researchgate.net/publication/329417202_Comparative_Analysis_of_Machine_Learning_Algorithms_for_Building_Archetypes_Development_in_Urban_Energy_Modeling [accessed Jan 24 2020].

¹⁸⁵ Martin Heine Kristensen, Rasmus Elbæk Hedegaard, Steffen Petersen (2018). Hierarchical calibration of archetypes for urban building energy modelling. *Energy & Buildings* 175 (2018) 219–234. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.030>

¹⁸⁶ Alaa Alhamwi, WidedMedjroubi, Thomas Vogt, Carsten Agert, GIS-based urban energy systems models and tools: Introducing a model for the optimisation of flexibilisation technologies in urban areas, *Applied Energy* 191 (2017) 1–9, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.048>

¹⁸⁷ Alaia Sola, Cristina Corchero, Jaume Salom, Manel Sanmarti, Multi-domain Urban-Scale Energy Modelling tools: a Review, *Sustainable Cities and Society*, Available online 19 October 2019, 101872, <https://doi:10.1016/j.scs.2019.101872>

¹⁸⁸ Yixing Chen, Tianzhen Hong, Impacts of building geometry modeling methods on the simulation results of urban building energy models, *Applied Energy*, Volume 215, 1 April 2018, Pages 717-735, <https://doi:10.1016/j.apenergy.2018.02.073>

¹⁸⁹ Yixing Chen, Tianzhen Hong, Mary Ann Piette, Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis, *Applied Energy* Volume 205, 1 November 2017, Pages 323-335, <http://dx.doi:10.1016/j.apenergy.2017.07.128>

¹⁹⁰ Giuliano Dall'O', Annalisa Galante, Marco Torri (2011); A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale; *Energy and Buildings* 48 (2011) 211–219; <https://doi:10.1016/j.enbuild.2012.01.034>

¹⁹¹ Stuart Gadsden, Mark Rylatt, Kevin Lomas, (2003); *Putting solar energy on the urban map: a new GIS-based approach for dwellings*; *Solar Energy* 74 (2003) 397–407

¹⁹² Massimiliano Condotta, Markus Biberacher, Sabine Gadocha, Andrea Mancuso, Stefano Picchio, Giovanni Borgia, Urban Energy Web. A transnational and common energy city platform for sustainability in the built environment, In *Proceeding of CISBAT 2015* Available from: https://www.researchgate.net/publication/283520894_Urban_Energy_Web_A_transnational_and_common_energy_city_platform_for_sustainability_in_the_built_environment [accessed Oct 30 2019].

¹⁹³ Hao Wang, Yisha Pan, Xiaochun Luo, Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis, *Automation in Construction* 103 (2019) 41–52, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.005>

¹⁹⁴ M. Del Giudice, A. Osello, E. Patti, BIM and GIS for district modeling, In: A. Mahdavi, B. Martens, R. Scherer (Eds.), *Proceedings of the 10th European Conference on Product and Process Modelling*, Vienna, Austria, September 17–19, 2014, pp. 851–854, <https://doi.org/10.1201/b17396-136>

¹⁹⁵ Marzia Bolpagni, Angelo Luigi Camillo Ciribini (2016), *The Information Modeling and the Progression of Data-Driven Projects Volume III. Building up business operations and their logic. Shaping materials and technologies*, 2016. https://www.academia.edu/25705262/The_Information_Modeling_and_the_Progression_of_Data-driven_Projects

¹⁹⁶ Z. Yuan, G.Q.P. Shen, Using IFC standard to integrate BIM models and GIS, In: Y. Wang, J. Yang, G.Q.P. Shen, J. Wong (Eds.), *2010 International Conference on Construction and Real Estate Management*, Brisbane, Australia, December 01–03 2010, pp. 224–229

- ¹⁹⁷ M. El-Mekawy, A. Ostman, I. Hijazi, A unified building model for 3D urban GIS, *ISPRS International Journal of Geo-Information* 1(2) (2012) 120–145, <https://doi.org/10.3390/ijgi1020120>
- ¹⁹⁸ S. Vilgertshofer, J. Amann, B. Willenborg, A. Borrmann, T.H. Kolbe, Linking BIM and GIS models in infrastructure by example of IFC and CityGML, In: K.Y. Lin, N. ElGohary, P. Tang (Eds.), *ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering*, Seattle, WA, June 25–27, 2017, pp. 133–140, <https://doi.org/10.1061/9780784480823.017>
- ¹⁹⁹ E.P. Karan, J. Irizarry, J. Haymaker, BIM and GIS integration and interoperability based on semantic web technology, *Journal of Computing In Civil Engineering* 30(3) (2016), [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000519](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000519)
- ²⁰⁰ A.H. Hor, A. Jadidi, G. Sohn, BIM-GIS integrated geospatial information model using semantic web and RDF graphs, In: L. Halounova, V. Safar, J. Jiang, H. Olesovska, P. Dvoracek, D. Holland, V.A. Seredovich, J.P. Muller, E.P.R. Rao, B. Veenendaal, L. mu, S. Zlatanova, J. Oberst, C.P. Yang, Y.B.S. Stylianidis, V. Vozenilek, A. Vondrakova, G. Gartner, F. Remondino, Y. Doytscher, G. Percivall, G.Schreier, I. Dowman, A. Streilein, J. Ernst (Eds.), *Xxiii ISPRS Congress*, Prague, Czech Republic, July 12–19, 2016, pp. 73–79, <https://doi.org/10.5194/isprsannals-iii-4-73-2016>
- ²⁰¹ Hao Wang, Yisha Pan, Xiaochun Luo (2019). Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis. *Automation in Construction* 103 (2019) 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.005>
- ²⁰² A.T. Albourae, C. Armenakis, M. Kyan, Architectural heritage visualization using interactive technologies, In: J. Hayes, C. Ouimet, M.S. Quintero, S. Fai, L. Smith (Eds.), *26th International Symposium of ICOMOS/ISPRS International scientific Committee on Heritage Documentation (CIPA) on Digital Workflows for Heritage Conservation*, Ottawa, Canada, August 28-September 01, 2017, pp. 7–13, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-7-2017>
- ²⁰³ A.E. Cengiz, Y. Guney, Comparison of 3D construction visualization methods to provide visual support in GIS environment for the construction projects, In: I. Ivan, P. Longley, D. Fritsch, J. Horak, J. Cheshire, T. Inspektor (Eds.), *10th International Symposium Geoinformatics for City Transformations*, Ostrava, Czech Republic, January 21–23, 2013, pp. 25–31 (ISBN: 978–80–248-2974-6)
- ²⁰⁴ Y. Deng, J.C.P. Cheng, C. Anumba, Mapping between BIM and 3D GIS in different levels of detail using schema mediation and instance comparison, *Automation in Construction* 67 (2016) 1–21, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.03.006>
- ²⁰⁵ S. Yamamura, L. Fan, Y. Suzuki, Assessment of urban energy performance through integration of BIM and GIS for smart city planning, In: L. Ding, F. Fiorito, P. Osmond (Eds.), *International High-Performance Built Environment Conference*, Sydney, Australia, November 17–18, 2016, pp. 1462–1472, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.309>
- ²⁰⁶ J. Zhu, G. Wright, J. Wang, X. Wang, A critical review of the integration of geographic information system and building information modelling at the data level, *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7(2) (2018), <https://doi.org/10.3390/ijgi7020066>
- ²⁰⁷ O. Gocer, Y. Hua, K. Gocer, A BIM-GIS integrated pre-retrofit model for building data mapping, *Building Simulation* 9(5) (2016) 513–527, <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0293-4>
- ²⁰⁸ Y. Bai, P.A. Zadeh, S. Staub-French, R. Pottinger, Integrating GIS and BIM for community-scale energy modeling, In: L. Soibelman, F. PenaMora (Eds.), *International Conference on Sustainable Infrastructure*, New York, NY, October 26–28, 2017, pp. 185–196, <https://doi.org/10.1061/9780784481196.017>
- ²⁰⁹ G. Costa, A. Sicilia, G.N. Lilis, D.V. Rovas, J. Izgara, A comprehensive ontologies based framework to support the retrofitting design of energy-efficient districts, In: S.E Christodoulou, R. Scherer (Eds.), *11th European Conference on Product and Process Modelling*, Limassol, Cyprus, September 07–09, 2016, pp. 673–681, [cited

-
- 2018 20/08]; Available from: http://smartcity.linkeddata.es/LDAC2016/presentations/OptEEemAL_LDAC_FUNITEC.pdf
- ²¹⁰ N. Salimzadeh, S.A. Sharif, A. Hammad, Visualizing and analyzing urban energy consumption: A critical review and case study, In: J.L. Perdomo-Rivera, A. Gonzalez-Quevedo, C. Lopez Del Puerto, F. Maldonado-Fortunet, O.I. Molina-Bas (Eds.), Construction Research Congress, San Juan, Puerto Rico, May 31–June 02, 2016, pp. 1323–1331, <https://doi.org/10.1061/9780784479827.133>
- ²¹¹ A. Redmond, B. Fies, A. Zarli, Developing an integrated cloud platform for enabling 'holistic energy management' in urban areas, In: A. Mahdavi, B. Martens, R. Scherer (Eds.), Proceedings of the 10th European Conference on Product and Process Modelling, Vienna, Australia, September 17–19, 2014, pp. 409–416, <https://doi.org/10.1201/b17396-69>
- ²¹² L. Bottaccioli, A. Aliberti, F.M. Ugliotti, A. Osello, E. Macii, E. Patti, A. Acquaviva, Building energy modelling and monitoring by integration of IoT devices and building information models, In: S. Reisman, S.I. Ahamed, C. Demartini, T. Conte, L. Liu, W. Claycomb, M. Nakamura, E. Tovar, S. Cimato, C.H. Lung, H. Takakura, J.J. Yang, T. Akiyama, Z. Zhang, K. Hasan (Eds.), 41st IEEE Annual Computer Software and Applications Conference, Torino, Italy, July 04–08, 2017, pp. 914–922. <https://doi.org/10.1109/compsac.2017.75>
- ²¹³ Kutzner, T., Hijazi, I. & Kolbe, T. H., 2018: Semantic Modelling of 3D Multi-utility Networks for Urban Analyses and Simulations – The CityGML Utility Network ADE. International Journal of 3-D Information Modeling (IJ3DIM), 7(2), 1-34: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1475038/1475038.pdf>
- ²¹⁴ I. Hijazi, M. Ehlers, S. Zlatanova, BIM for Geo-analysis (BIM4GEOA): Set up of 3D information system with open source software and open specification (os), In: T.H.Kolbe, G. Konig, C. Nagel (Eds.), 5th International Conference on 3d Geoinformation, Berlin, germany, November 03–04, 2010, pp. 45–49, [cited 201820/08]; Available from: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/4-w15/Paper_ISPRS/Oral/10_3DGeoInfo2010_159_Hijazi_BIM4GEOA.pdf.
- ²¹⁵ G. Jia, K. Liao, 3D modeling based on cityengine, In: L. Liu, C. Yang, J. Ke (Eds.), International Conference on Advances in Materials, Machinery, Electronics, Wuhan, Peoples Republic China, February 25–26, 2017, <https://doi.org/10.1063/1.4977305>
- ²¹⁶ C. Mignard, C. Nicolle, Merging BIM and GIS using ontologies application to urban facility management in ACTIVE3D, Computers in Industry 65(9) (2014) 1276–1290, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.07.008>
- ²¹⁷ J. Gil, J. Beirao, N. Montenegro, J. Duarte, Assessing computational tools for urban design towards a "city Information model", In: G. Schmitt, L. Hovestad, L. VanGool, F. Bosche, R. Burkhard, S. Coleman, J. Halatsch, M. Hansmeyer, S. KonsorskiLang, A. Kunze, M. SehmiLuck (Eds.), 28th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe, Zurich, Switzerland, September 15–18, 2010, pp. 361–369, (ISBN 978-0-9541183-9-6)
- ²¹⁸ <http://www.sardegnaegeoportale.it/index.php?xsl=2425&s=325563&v=2&c=14414&t=1&tb=14401>
- ²¹⁹ Decreto legislativo 18 aprile 2016, n. 50. Codice dei contratti pubblici.
- ²²⁰ Decreto del Ministro delle Infrastrutture e Trasporti 01 Dicembre 2017 n. 560.
- ²²¹ Ciribini, A. L. C. "BIM e digitalizzazione dell'ambiente costruito." Grafill, Palermo (2016).
- ²²² <https://www.catasto.it/categorie.html>
- ²²³ <https://www.istat.it/it/dati-analisi-e-prodotti/microdati>
- ²²⁴ <http://www.regione.sardegna.it/j/v/2420?s=1&v=9&c=15032&esp=1&tb=15028>

²²⁵ <https://www.provincia.sudsardegna.it/it/page/impianti-termici-cc44b5f4-9ce5-4643-afad-0b1bce9b21fe>

²²⁶ https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/statistiche/dnn_ctr4338_TernaViewDocumentView_grdDocumentChangePage/2

²²⁷ <https://www.sardegna.sira.it/energia1;jsessionid=8E52E1B297BAB0571143FCDE8A47A12F>

²²⁸ <https://www.sardegna.sira.it/energia1;jsessionid=8E52E1B297BAB0571143FCDE8A47A12F>

²²⁹ <http://www.sardegna.geoportale.it/areetematiche/catasto/>